



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“AUTOMATIZACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS  
PARA EL BANCO DE PRUEBAS DE LA CHIMENEA DE  
EQUILIBRIO DEL LABORATORIO DE  
TURBOMAQUINARIA HIDRÁULICA DE LA  
FACULTAD DE MECÁNICA”**

**FARINANGO PABÓN LUIS ALFONSO  
VILLACÍS PADILLA JONATÁN DANIEL**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:  
INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2014**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

2013-04-16

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**LUIS ALFONSO FARINANGO PABÓN**

---

Titulada:

**“AUTOMATIZACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL BANCO  
DE PRUEBAS DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DEL LABORATORIO DE  
TURBOMAQUINARIA HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Pablo Montalvo  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Marco Ordoñez  
ASESOR DE TESIS

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

2013-04-16

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**JONATÁN DANIEL VILLACÍS PADILLA**

---

Titulada:

**“AUTOMATIZACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL BANCO  
DE PRUEBAS DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DEL LABORATORIO DE  
TURBOMAQUINARIA HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Pablo Montalvo  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Marco Ordoñez  
ASESOR DE TESIS

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** LUIS ALFONSO FARINANGO PABÓN

**TÍTULO DE LA TESIS:** “AUTOMATIZACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL BANCO DE PRUEBAS DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DEL LABORATORIO DE TURBOMAQUINARIA HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”

**Fecha de Examinación:** 2014-02-10.

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN                            | APRUEBA | NO<br>APRUEBA | FIRMA |
|--|---------|---------------|-------|
| Ing. Telmo Moreno.<br>(PRESIDENTE TRIB. DEFENSA) |         |               |       |
| Ing. Pablo Montalvo<br>(DIRECTOR DE TESIS)       |         |               |       |
| Ing. Marco Ordoñez<br>(ASESOR)                   |         |               |       |

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** JONATÁN DANIEL VILLACÍS PADILLA

**TÍTULO DE LA TESIS:** “AUTOMATIZACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL BANCO DE PRUEBAS DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DEL LABORATORIO DE TURBOMAQUINARIA HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”

**Fecha de Examinación:** 2014-02-10.

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN                            | APRUEBA | NO<br>APRUEBA | FIRMA |
|--|---------|---------------|-------|
| Ing. Telmo Moreno.<br>(PRESIDENTE TRIB. DEFENSA) |         |               |       |
| Ing. Pablo Montalvo<br>(DIRECTOR DE TESIS)       |         |               |       |
| Ing. Marco Ordoñez<br>(ASESOR)                   |         |               |       |

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

Luis Alfonso Farinango Pabón

---

Jonatán Daniel Villacís Padilla

## **DEDICATORIA**

La presente tesis dedico a Dios por haberme bendecido con vida, guiándome con sabiduría.

A toda mi familia, en especial a mis padres José Valerio y Delia María ya para ellos es un galardón vivir cada satisfacción, cada triunfo alcanzado por sus hijos, que sin su apoyo incondicional, esfuerzo y paciencia que me han brindado en todo el transcurso de mi carrera, no habría logrado alcanzar con éxito esta meta.

A mis hermanos: Hortencia, Mesías, Ernesto, Rosa y a todos mis queridos sobrinos.

**Luis Farinango Pabón**

Principalmente dedico esta tesis a Dios, quien me dio salud y sabiduría para ejecutarla, a mis padres Antonio y Rosario, ya que me brindaron apoyo y fortaleza en el desarrollo y transcurso de ésta, así como a mis hermanos: Alexander, Silvia, David y Mónica, y a mi novia Rocío.

**Jonatán Villacís Padilla**

## **AGRADECIMIENTO**

Mi más sincero agradecimiento a Dios, por mi familia que con mucho esfuerzo me apoyaron constantemente en todas las necesidades, y encomendándome a Dios en sus oraciones.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica por permitirme alcanzar la carrera profesional.

Al Ing. Pablo Montalvo director de tesis y al Ing. Marco Ordoñez asesor de tesis, quienes han sido guías en la realización del presente trabajo.

A todos mis profesores por compartir el conocimiento necesario a lo largo de la carrera, y a mis amigos.

A todos ellos mi sincero gratitud.

**Luis Farinango Pabón**

Agradecemos a Dios que me ha permitido llegar hasta aquí y por darme una familia tan maravillosa que siempre me estuvo apoyando.

Un agradecimiento muy especial a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo puesto que me brindo conocimientos que me ayudo para el desarrollo de este proyecto. Un agradecimiento especial al Ing. Ing. Pablo Montalvo Director de Tesis e Ing. Marco Ordoñez Asesor de Tesis quienes con sus conocimientos y apoyo ayudaron a culminar con éxito el trabajo de tesis.

A Luis, compañero de tesis, y a mis amigos y demás familiares que siempre estuvieron presentes durante mi vida estudiantil, apoyándome de una u otra manera.

**Jonatán Villacís Padilla**



# CONTENIDO

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>                                |      |
| 1.1 Antecedentes.....   | 1    |
| 1.2 Justificación .....   | 2    |
| 1.2.1 Técnica.....  | 2    |
| 1.2.2 Económica.....  | 2    |
| 1.2.3 Académica.....  | 2    |
| 1.3 Objetivos.....  | 2    |
| 1.3.1 Objetivo general.....                                       | 2    |
| 1.3.2 Objetivos específicos.....                                  | 3    |
| <b>2. MARCO TEÓRICO</b>   |      |
| 2.1 Golpe de ariete.....  | 4    |
| 2.1.1 Introducción.....   | 4    |
| 2.1.2 Explicación del golpe de ariete .....                       | 5    |
| 2.2 Consecuencias del golpe de ariete .....                       | 7    |
| 2.3 Sistemas de control del golpe de ariete.....                  | 9    |
| 2.3.1 Controles que actúan sobre la fuente.....                   | 9    |
| 2.3.2 Controles que actúan sobre la perturbación.....             | 9    |
| 2.3.2.1 Dispositivos de acción directa.....                       | 9    |
| 2.3.3 Dispositivos de acción indirecta.....                       | 10   |
| 2.4 Descripción de la chimenea de equilibrio.....                 | 15   |
| 2.4.1 Ventajas y desventajas de la chimenea de equilibrio.....    | 17   |
| 2.5 Aplicaciones de la chimenea de equilibrio .....               | 18   |
| 2.5.1 Chimenea de equilibrio en centrales hidroeléctricas.....    | 18   |
| 2.6 Tipos de chimenea de equilibrio.....                          | 21   |
| 2.6.1 Chimeneas de equilibrio simples.....                        | 21   |
| 2.6.2 Chimeneas de equilibrio con orificio restringido.....       | 22   |
| 2.6.3 Chimenea de equilibrio amortiguada.....                     | 23   |
| 2.6.4 Chimeneas compuestas o de sección transversal variable..... | 24   |
| 2.6.5 Chimeneas de oscilación diferencial.....                    | 26   |
| 2.6.6 Chimeneas de equilibrio de aire o neumática.....            | 27   |
| 2.7 Variables y ecuaciones del golpe de ariete .....              | 28   |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 2.7.1    | <i>Cierre total o parcial en una tubería elástica.</i>                | 28 |
| 2.7.2    | <i>Propagación de ondas de velocidad y presión</i>                    | 28 |
| 2.7.3    | <i>Presión máxima en cierre total, lento y uniforme de la válvula</i> | 29 |
| 2.7.4    | <i>Tubería de característica variable</i>                             | 30 |
| 2.8      | <i>Banco de pruebas chimenea de equilibrio</i>                        | 31 |
| 2.9      | <i>Automatización y su importancia</i>                                | 33 |
| 2.9.1    | <i>Concepto de automatización</i>                                     | 33 |
| 2.9.2    | <i>Importancia de la automatización</i>                               | 33 |
| 2.9.3    | <i>Tipos de automatización</i>  | 34 |
| 2.9.3.1  | <i>La automatización fija</i>   | 34 |
| 2.9.3.2  | <i>La automatización flexible</i>                                     | 34 |
| 2.9.3.3  | <i>El control automático de procesos</i>                              | 34 |
| 2.9.3.4  | <i>El procesamiento electrónico de datos</i>                          | 34 |
| 2.9.3.5  | <i>El control numérico computarizado</i>                              | 35 |
| 2.9.4    | <i>Técnicas de automatización</i>                                     | 35 |
| 2.9.4.1  | <i>Automatización mecánica</i>  | 35 |
| 2.9.4.2  | <i>Automatización neumática</i>                                       | 35 |
| 2.9.4.3  | <i>Automatización hidráulica</i>                                      | 35 |
| 2.9.4.4  | <i>Automatización eléctrica</i>                                       | 35 |
| 2.9.4.5  | <i>Automatización electrónica</i>                                     | 35 |
| 2.10     | <i>Descripción de medición de variables</i>                           | 36 |
| 2.10.1   | <i>Definición del sensor</i>  | 36 |
| 2.10.2   | <i>Definición del transductor</i>                                     | 36 |
| 2.10.3   | <i>Definición del actuador</i>  | 37 |
| 2.10.4   | <i>Medición de presión</i>  | 37 |
| 2.10.4.1 | <i>Tipos de presión</i>   | 37 |
| 2.10.4.2 | <i>Instrumentos para medición de la presión</i>                       | 39 |
| 2.10.5   | <i>Medición de nivel</i>  | 45 |
| 2.10.5.1 | <i>Instrumentos para medición de nivel</i>                            | 45 |
| 2.10.5.2 | <i>Medidores de nivel de líquidos</i>                                 | 45 |
| 2.10.5.3 | <i>Medidores de nivel de sólidos</i>                                  | 48 |
| 2.10.6   | <i>Medición de flujo y caudal</i>                                     | 49 |
| 2.10.6.1 | <i>Instrumentos para medición de flujo</i>                            | 49 |
| 2.10.7   | <i>Medición de proximidad</i>   | 50 |
| 2.10.7.1 | <i>Instrumentos para medición de proximidad</i>                       | 50 |
| 2.11     | <i>Descripción del sistema de adquisición de datos</i>                | 53 |
| 2.11.1   | <i>Introducción</i>   | 53 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 2.11.2    | <i>Partes de un sistema DAQ.</i>  | 53 |
| 2.11.2.1  | <i>Descripción del sensor.</i>  | 54 |
| 2.11.2.2  | <i>Descripción del dispositivo DAQ.</i>   | 54 |
| 2.11.2.3  | <i>Descripción de la función de la PC en un sistema DAQ.</i>  | 55 |
| 2.12      | <i>Descripción del software LabVIEW</i>   | 55 |
| 2.12.1    | <i>Introducción.</i>  | 55 |
| 2.12.2    | <i>Principales áreas de aplicacione.</i>  | 56 |
| 2.12.3    | <i>Diseño de instrumentación virtual.</i>   | 56 |
| 2.12.4    | <i>Descripción de un VI.</i>  | 57 |
| <b>3.</b> | <b>PUESTA A PUNTO DEL BANCO DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO</b>  |    |
| 3.1       | <i>Descripción del banco de prueba de la chimenea de equilibrio.</i>  | 58 |
| 3.2       | <i>Mantenimiento del sistema de alimentación.</i>   | 58 |
| 3.2.1     | <i>Bomba centrífuga.</i>  | 58 |
| 3.2.2     | <i>Reservorio.</i>  | 59 |
| 3.2.3     | <i>Depósito.</i>  | 59 |
| 3.2.4     | <i>Tubería.</i>   | 60 |
| 3.3       | <i>Mantenimiento de las válvulas de paso</i>  | 60 |
| 3.4       | <i>Mantenimiento de la chimenea de equilibrio y accesorios</i>  | 60 |
| 3.5       | <i>Puesta a punto de la chimenea de equilibrio.</i>   | 61 |
| <b>4.</b> | <b>PROYECCIÓN Y SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS E INSTRUMENTOS DEL BANCO DE PRUEBAS DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO</b> |    |
| 4.1       | <i>Proyección del banco de prueba de la chimenea de equilibrio</i>  | 62 |
| 4.2       | <i>Cálculo tipo.</i>  | 62 |
| 4.2.1     | <i>Estudio de las variables a ser medidas.</i>  | 63 |
| 4.3       | <i>Datos técnicos de equipos e instrumentos</i>   | 70 |
| 4.4       | <i>Selección del sistema de adquisición de datos.</i>   | 71 |
| 4.5       | <i>Selección de los instrumentos de medición de variables y fuente de alimentación.</i>                       | 74 |
| 4.5.1     | <i>Transductores de presión.</i>  | 74 |
| 4.5.2     | <i>Fuente de alimentación.</i>  | 76 |
| <b>5.</b> | <b>MONTAJE DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS EN EL BANCO DE PRUEBAS DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO</b>                  |    |
| 5.1       | <i>Tecnología de montaje.</i>   | 77 |
| 5.1.1     | <i>Parte hidráulica.</i>  | 77 |
| 5.1.2     | <i>Adquisición de datos.</i>  | 77 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| 5.2       | Automatización de la toma de datos del banco de prueba chimenea de equilibrio .....    | 79  |
| 5.2.1     | <i>Adquisición de datos y procesamiento de señales.</i> .....                          | 79  |
| 5.2.2     | <i>Calibración de los transmisores de presión SITRANS P220.</i> .....                  | 81  |
| 5.3       | Representación de variables medidas en el programa LabVIEW .....                       | 83  |
| 5.3.1     | <i>Descripción del panel frontal del primer ensayo: Golpe de ariete.</i> .....         | 84  |
| 5.3.2     | <i>Descripción del panel frontal del segundo ensayo: Chimenea de equilibrio.</i> ..... | 85  |
| <b>6.</b> | <b>FASE EXPERIMENTAL</b>   |     |
| 6.1       | Realización de las pruebas .....   | 87  |
| 6.2       | Resultados de las pruebas .....  | 88  |
| 6.3       | Análisis de resultados .....   | 92  |
| 6.4       | Plan de mantenimiento .....  | 92  |
| 6.5       | Manual de operaciones .....  | 93  |
| 6.5.1     | <i>Antes de empezar a operar el banco.</i> .....                                       | 93  |
| 6.5.2     | <i>Puesta en marcha inicial.</i> .....   | 93  |
| 6.5.3     | <i>Durante la operación.</i> .....   | 93  |
| 6.5.4     | <i>Después de la operación.</i> .....  | 93  |
| 6.6       | Descripción de ensayos y guías del laboratorio .....                                   | 94  |
| 6.6.1     | <i>Descripción de ensayos.</i> .....   | 94  |
| 6.6.2     | <i>Guías del laboratorio.</i> .....  | 94  |
| <b>7.</b> | <b>ANÁLISIS DE COSTOS</b>  |     |
| 7.1       | Descripción del análisis de costos .....   | 101 |
| 7.2       | Costos directos .....  | 101 |
| 7.2.1     | <i>Costos de accesorios y materiales.</i> .....  | 101 |
| 7.2.2     | <i>Costos de maquinaria y equipos utilizados.</i> .....                                | 102 |
| 7.2.3     | <i>Costos de mano de obra.</i> .....   | 102 |
| 7.3       | Costos indirectos .....  | 103 |
| 7.4       | Costos totales .....   | 103 |
| <b>8.</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>  |     |
| 8.1       | Conclusiones .....   | 104 |
| 8.2       | Recomendaciones .....  | 104 |

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## LISTA DE TABLAS

|    |  | Pág. |
|----|--|------|
| 1  | Sistemas de control del golpe de ariete.....                 | 14   |
| 2  | Coeficiente K para diferentes materiales.....                | 20   |
| 3  | Valores del módulo de elasticidad.....                       | 29   |
| 4  | Elementos mecánicos.....                                     | 42   |
| 5  | Datos de altura y tiempo.....                                | 62   |
| 6  | Datos experimentales tiempo vs volumen.....                  | 64   |
| 7  | Especificaciones de NI USB – 6009.....                       | 72   |
| 8  | Especificaciones del transmisor de presión SITRANS P220..... | 75   |
| 9  | Terminal análogo.....  | 78   |
| 10 | Terminal digital.....  | 79   |
| 11 | Datos de presión y voltaje.....                              | 83   |
| 12 | Datos de presión 1 y tiempo.....                             | 88   |
| 13 | Datos de presión 2 y tiempo.....                             | 89   |
| 14 | Datos de altura y tiempo.....                                | 90   |
| 15 | Datos de presión 3 y tiempo.....                             | 91   |
| 16 | Cuadro comparativo de P1, P2 y P3.....                       | 92   |
| 17 | Costos de accesorios y materiales.....                       | 101  |
| 18 | Costo de maquinaria y equipos utilizados.....                | 102  |
| 19 | Costo de mano de obra.....                                   | 102  |
| 20 | Costos directos.....   | 102  |
| 21 | Costos indirectos.....                                       | 103  |
| 22 | Costos totales.....  | 103  |

## LISTA DE FIGURAS

|    |   | Pág. |
|----|---|------|
| 1  | Esquema de instalación susceptible al fenómeno de golpe de ariete.....  | 4    |
| 2  | a) Golpe de ariete positivo por cierre de la válvula, b) golpe de ariete negativo por apertura de la válvula..... | 5    |
| 3  | Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula.....  | 5    |
| 4  | Esquema del proceso de golpe de ariete.....   | 6    |
| 5  | Tuberías y accesorios destruidos por un golpe de ariete.....  | 8    |
| 6  | Instalación de un volante de inercia.....   | 9    |
| 7  | Instalación de una válvula con cierre programado.....   | 10   |
| 8  | Depósitos unidireccionales por debajo de las alturas piezométricas.....   | 11   |
| 9  | Esquema de un calderín de aire.....   | 11   |
| 10 | Instalación de un by-pass junto a la bomba.....   | 12   |
| 11 | Ventosa para control de transitorios.....   | 13   |
| 12 | Esquema de dos válvulas de alivio de construcción diferente.....  | 13   |
| 13 | Instalación de una VRP para el control de sobrepresiones en un transitorio.....                                   | 14   |
| 14 | Esquema con chimenea de equilibrio.....   | 16   |
| 15 | Chimenea de equilibrio en centrales hidroeléctricas.....  | 18   |
| 16 | Esquema de una chimenea de equilibrio simple.....   | 22   |
| 17 | Esquema de una chimenea de equilibrio con orificio restringido.....   | 23   |
| 18 | Esquema de una chimenea de equilibrio amortiguada.....  | 24   |
| 19 | Esquema de una chimenea de equilibrio compuesta con aumento de la sección transversal superior.....               | 24   |
| 20 | Esquema de una chimenea de equilibrio compuesta con aumento en la sección en diferentes zonas.....                | 25   |
| 21 | Esquema de una chimenea de equilibrio compuesta con cámaras laterales.....  | 25   |
| 22 | Esquema de una chimenea de equilibrio diferencial.....  | 26   |
| 23 | Esquema de una chimenea de equilibrio neumática.....  | 27   |
| 24 | Esquema de una chimenea de equilibrio.....  | 31   |
| 25 | Sistema de control de nivel.....  | 36   |
| 26 | Sensor complejo, incorpora varios transductores, e1, e2.....  | 37   |
| 27 | Diferentes tipos de presión.....  | 38   |
| 28 | Manómetro de tubo en U.....   | 39   |
| 29 | Manómetro de tubo inclinado.....  | 39   |
| 30 | Manómetro de pozo.....  | 40   |
| 31 | Tubo Bourdon.....   | 40   |
| 32 | Elemento en espiral.....  | 41   |
| 33 | Tipo helicoidal.....  | 41   |
| 34 | Tipo diafragma.....   | 41   |
| 35 | Indicador de fuelle.....  | 42   |
| 36 | Transmisor de equilibrio de movimiento tipo fuelle.....   | 43   |
| 37 | Transmisor de equilibrio de fuerzas.....  | 43   |
| 38 | Clasificación de los instrumentos para medición de nivel.....   | 45   |
| 39 | Clasificación de los instrumentos para medición de nivel de fluidos.....  | 45   |
| 40 | a) Estanque abierto, b) estanque cerrado.....   | 46   |
| 41 | Instrumentos basados en la presión hidrostática.....  | 46   |
| 42 | Instrumentos basados en el desplazamiento.....  | 47   |
| 43 | Instrumentos basados en conductividad eléctrica.....  | 48   |
| 44 | Clasificación de los instrumentos para medición de nivel de sólidos.....  | 48   |
| 45 | Medidor de tubo Venturi.....  | 49   |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 46 | Medidor de turbina.....  | 50 |
| 47 | Sensor resistivo.....  | 50 |
| 48 | Sensor inductivo.....  | 51 |
| 49 | Símbolo de un sensor inductivo, conexiones PNP y NPN.....        | 51 |
| 50 | Sensor capacitivo.....   | 52 |
| 51 | Sensor óptico.....   | 52 |
| 52 | Sensor ultrasónico.....  | 53 |
| 53 | Partes de un sistema DAQ.....                                    | 53 |
| 54 | Bomba centrífuga.....  | 59 |
| 55 | Reservorio.....  | 59 |
| 56 | Depósito.....  | 59 |
| 57 | Tubería.....   | 60 |
| 58 | Accesorios.....  | 60 |
| 59 | Chimenea de equilibrio.....                                      | 61 |
| 60 | Banco de pruebas chimenea de equilibrio.....                     | 61 |
| 61 | Oscilación del golpe de ariete en la chimenea de equilibrio..... | 63 |
| 62 | Estudio de las variables en la chimenea de equilibrio.....       | 63 |
| 63 | Distribución de la sobrepresión.....                             | 67 |
| 64 | NI USB-6009.....   | 72 |
| 65 | Transmisor de presión SITRANS P220.....                          | 74 |
| 66 | Diagrama de función SITRANS P220.....                            | 76 |
| 67 | Fuente de alimentación KY-24W-12L.....                           | 76 |
| 68 | Conexión a dos hilos.....  | 78 |
| 69 | Configuración de la tarjeta NI USB 6009.....                     | 80 |
| 70 | Configuración de parámetros para la adquisición de datos.....    | 80 |
| 71 | Selección de canales para los transmisores de presión.....       | 81 |
| 72 | Calibración de transmisores de presión.....                      | 81 |
| 73 | Configuración de parámetros para la calibración.....             | 82 |
| 74 | Toma de valores de voltaje.....                                  | 82 |
| 75 | Gráfica de presión vs voltaje.....                               | 83 |
| 76 | Panel frontal: primer ensayo.....                                | 84 |
| 77 | Panel frontal: segundo ensayo.....                               | 85 |
| 78 | Pruebas del primer ensayo.....                                   | 87 |
| 79 | Pruebas del segundo ensayo.....                                  | 88 |
| 80 | Presión 1 vs tiempo: golpe de ariete.....                        | 89 |
| 81 | Presión 2 vs tiempo: golpe de ariete.....                        | 89 |
| 82 | Altura vs tiempo: chimenea de equilibrio.....                    | 90 |
| 83 | Presión vs tiempo: chimenea de equilibrio.....                   | 91 |

## SIMBOLOGÍA

|                  |  |                 |
|------------------|--|-----------------|
| $H_B$            | Caída bruta                                    | m               |
| $S_{CH}$         | Sección de la Chimenea de Equilibrio           | $m^2$           |
| $S_T$            | Sección de la tubería                          | $m^2$           |
| $t_h$            | Tiempo hidráulico                              | s               |
| $Y_E$            | Nivel en la chimenea de equilibrio             | m               |
| $P_{at}$         | Presión atmosférica                            | $\frac{N}{m^2}$ |
| $P_i$            | Presión interna                                | $\frac{N}{m^2}$ |
| $S_{ch-min}$     | Área mínima estable de la chimenea             | $m^2$           |
| $V_t$            | Velocidad en la conducción                     | $\frac{m}{s}$   |
| $Z_{máx.}$       | Altura máxima                                  | m               |
| $t_o$            | Tiempo   | s               |
| $A_{ch}/A_{tub}$ | Relación área chimenea, área tubería           | adimensional    |
| $c$              | Velocidad de propagación de la onda, celeridad | $\frac{m}{s}$   |
| $D$              | Diámetro interior                              | m               |
| $H$              | Altura en la chimenea en reposo                | m               |
| $h_p$            | Caída de presión                               | $\frac{N}{m^2}$ |
| $L$              | Longitud                                       | m               |
| $M$              | Masa del agua                                  | kg              |
| $\delta$         | Espesor  | m               |
| $T$              | Período  | Hz              |
| $y$              | Sobrepresión                                   | $\frac{N}{m^2}$ |
| $\gamma$         | Peso específico del agua                       | $\frac{N}{m^3}$ |



## **LISTA DE ABREVIACIONES**

|       |                               |
|-------|-------------------------------|
| VPR   | Válvula reguladora de presión |
| I / O | input/output                  |
| DAQ   | Adquisición de datos          |
| VI    | Virtual Instruments           |
| NPN   | Negativo positivo negativo    |
| PNP   | Positivo negativo positivo    |
| Vcd   | Voltaje de corriente directa  |
| PAC   | Programmable Analogic Control |

## **LISTA DE ANEXOS**

- A**    Fotografías del banco de pruebas chimenea de equilibrio
- B**    Características del transmisor de presión SITRANS P220
- C**    Características de la DAQ NI USB 6009
- D**    Plan de mantenimiento
- E**    Tabla de resultados
- F**    Facturas de adquisición

## **RESUMEN**

Se ha automatizado la toma de datos del banco de pruebas “chimenea de equilibrio”, con la finalidad de obtener resultados de las variaciones de presión, y realizar el estudio del comportamiento del golpe de ariete en dos tuberías con características similares, en una ellas de va instalada la chimenea de equilibrio y en la otra no. La medición de las variaciones de presión se realizó mediante transmisores de presión SITRANS P220, tarjeta DAQ NI USB 6009 y el software LabView.

En el primer ensayo, el cierre instantáneo de la válvula genera el golpe de ariete, donde la energía cinética del agua es convertida en energía de presión. Las oscilaciones producidas son medidas por medio de dos transmisores de presión P1 y P2, y registradas por el software LabView, para luego generar un reporte en Excel.

En el segundo ensayo se genera un golpe de ariete mediante el cierre instantáneo de la válvula, provocando que la energía cinética del agua se convierta en energía potencial en la chimenea de equilibrio. Las vibraciones de sobrepresión son medidas por un transmisor de presión P3 situado en la base de la chimenea de equilibrio y representadas en el software Labview, para luego generar un reporte en Excel similar al anterior, que serán utilizados por los estudiantes en los laboratorios.

Como conclusión se pudo comprobar el grave problema que significa el golpe de ariete en los sistemas hidráulicos, y la necesidad de instalar un dispositivo para la reducción del mismo.

## **ABSTRACT**

It has automated data collection testbed “surge tank” in order to get results from pressure variations, and to carry out the study of the behaviour of water hammer in two pipe lines with similar characteristics, in one of them the surge tank is installed and in the other one it is not. Pressure variations measurement was carried out through pressure transmitters SITRANS P220, DAQ NI USB 6009 card and LabView software.

In the first trial, valve's instant closure generates the water hammer, where kinetic energy of water is converted into pressure energy. Produced oscillations are measured by means of two pressure transmitters P1 and P2 and then registered by LabView software for finally report it by Excel.

In the second trial water hammer is generated through the valve's instant closure, provoking that kinetic energy of water becomes into potential energy at the surge tank. Vibrations produced by overpressure are measured by a pressure transmitter P3 located at the base of the surge tank and represented in the LabView software, and then generate a report in Excel that will be used by students in laboratories.

In conclusion it was noted the serious problem which means the water hammer in hydraulics systems, and the need to install a device for the reduction.

## **CAPÍTULO I**

### **1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

#### **1.1 Antecedentes**

Con el comienzo del desarrollo de las primeras máquinas, la medición de variables se realizaba en forma visual por medio de indicadores ubicados en diferentes equipos, donde el operario era el encargado de diagnosticar el estado del proceso, que estaba expuesto a cometer errores, dando como consecuencia baja productividad.

Con el surgimiento de la revolución industrial se ha visto la necesidad de innovar y mejorar por medio de sistemas automatizados, que disminuye la necesidad de tener presente en el lugar del proceso al operario, así como los riesgos que conlleva, además de mejorar la precisión en la toma de datos, dando como resultado mayor producción y desarrollo en muchos países.

Hoy en día gracias a los avances tecnológicos se ha realizado la automatización de muchos equipos con la mejora en el control de calidad por medio de los instrumentos de medición y control, para optimizar su competitividad y eficiencia.

Una de las aplicaciones que ha exigido esta automatización es la chimeneas de equilibrio que es un pozo vertical o inclinado abierto o en contacto con el aire, que tiene la misión de reducir al máximo las consecuencias nocivas provocadas por los golpes de ariete, generalmente aplicadas en centrales hidroeléctricas y se sitúa al final de la tubería de presión, cercana a las turbinas con el fin de proteger las válvulas, turbinas y sistemas de tuberías para mejorar significativamente la eficiencia energética, empleando equipos e instrumentos de mayor precisión.

Es por esta razón que se ha visto la necesidad de implementar la automatización de la adquisición de datos para el banco de pruebas de la chimenea de equilibrio en la Facultad de Mecánica con la aplicación de nuevas tecnologías, que permita obtener resultados confiables, para conocer las variables y sus efectos en el proceso, con el fin de obtener la eficiencia en el sistema.

## **1.2 Justificación**

**1.2.1 Técnica.** Los conocimientos adquiridos teóricamente y su aplicación en laboratorios con equipos desactualizados, ha sido una deficiencia para el desarrollo técnico de los estudiantes de Ingeniería que tienen grandes dificultades en la adaptación en el campo laboral.

La ESPOCH tiene como objetivo, la formación de profesionales con talento humano, competitivos con educación de alto nivel y capacidades para el desarrollo del país, en la que se enfrenta a circunstancias de diferentes áreas de la Ingeniería que se presentan en las grandes industrias y en la vida diaria. La Facultad de Mecánica ha impulsado por medio de los avances tecnológicos la automatización de los bancos de pruebas para generar y perfeccionar la formación académica y realizar investigación formativa en el área de turbomaquinaria hidráulica en los laboratorios.

**1.2.2 Económica.** La inversión en educación, recursos científicos y tecnológicos es uno de los pilares para el progreso económico de la sociedad como también para cubrir las necesidades y demandas del país. Al tener los bancos de pruebas en óptimas condiciones se puede realizar ensayos en las que se obtienen resultados similares a las que se presentan en grandes sistemas, con la ventaja de que los ensayos a escala permiten reducir costos significativamente.

**1.2.3 Académica.** La importancia para el desarrollo de la formación académica de los estudiantes de la Facultad de Mecánica exige que los laboratorios de Turbomaquinaria Hidráulica como es la chimenea de equilibrio sea funcional, con equipos e instrumentos debidamente actualizados para obtener resultados fiables y precisos, la misma que conlleva al desarrollo social en este mundo globalizado en la que los avances tecnológicos cada vez son más exigentes.

## **1.3 Objetivos**

**1.3.1 Objetivo general.** Automatizar la adquisición de datos en el banco de pruebas de la chimenea de equilibrio del Laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica de la Facultad de Mecánica.

### **1.3.2**    *Objetivos específicos:*

Describir el funcionamiento del banco de pruebas de chimenea de equilibrio.

Dar mantenimiento y evaluar las condiciones físicas y mecánicas del banco de la chimenea de equilibrio y ponerlo a punto.

Realizar la toma de datos de las variables existentes en el banco de pruebas antes y después de la instalación de sensores.

Utilizar el software LabVIEW para visualizar las variables.

Elaborar el Manual de Operaciones con guías de laboratorio.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

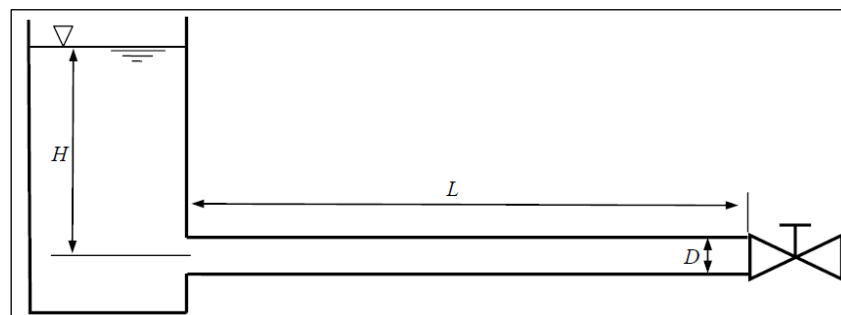
#### 2.1 Golpe de ariete

**2.1.1 Introducción.** El estudio del fenómeno del golpe de ariete o también denominado transitorio, se basa en la teoría de la onda elástica, que interpreta el desplazamiento a una velocidad determinada, de las variaciones de presión a lo largo de una tubería. Con este planteamiento, se elimina la idea inicial de asemejar la tubería de conducción como un cuerpo rígido.

Este fenómeno se produce en los conductos al cerrar o abrir una válvula y al poner en marcha o parar una máquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el caudal. Un caso importante ocurre en las centrales hidroeléctricas. (MATAIX, 1986 pág. 312)

La *figura 1*, representa una tubería de longitud  $L$ , espesor  $e$  y diámetro interior  $D$  por la que circula agua proveniente de un depósito aguas arriba y que termina en una válvula en su extremo derecho.

Figura 1. Esquema de instalación susceptible al fenómeno de golpe de ariete.

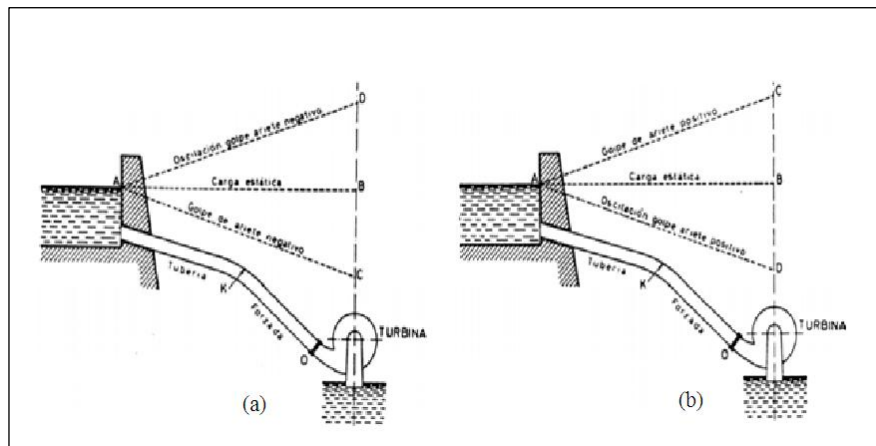


Fuente: Autores.

Si se cierra ésta rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la energía cinética, ésta se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería así como en un trabajo necesario para dilatar esta última: golpe de ariete positivo. Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión: golpe de ariete negativo, como se indica la *figura 2*.



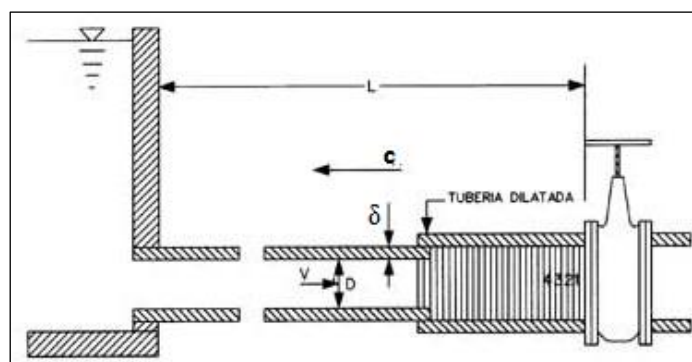
Figura 2. **(a)** Golpe de ariete positivo por cierre de la válvula, **(b)** Golpe de ariete negativo por apertura de la válvula.



Fuente: <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m200018/doc1.pdf>

**2.1.2 Explicación del golpe de ariete.** Aunque es físicamente imposible cerrar una válvula instantáneamente, el estudio inicial del caso de cierre instantáneo ayuda al estudio de los casos reales. Al cerrarse por completo instantáneamente la válvula de la figura 3 ( $c$  es la velocidad de propagación de la onda y  $v$  la velocidad del fluido. La tubería se dilata o se contrae al avanzar la onda de presión), dividimos imaginariamente todo el fluido que llena la tubería en rodajas 1, 2, 3 y 4, en la cual quedará primero en reposo la rodaja 1 y a continuación la 2, 3 y 4, etc., durante un cierto tiempo.

Figura 3. Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula.

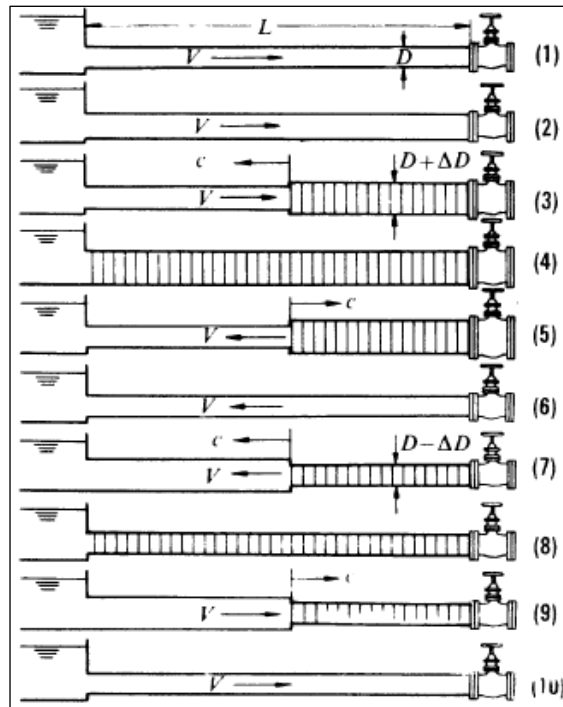


Fuente: <http://www.nacion.com/netinc/VIEJOS/durman/matec/capitulo07-02.html>

De esta forma, se ha creado una onda elástica, una onda de presión que se propaga por la tubería, se refleja en el depósito, vuelve a la válvula y de nuevo al depósito, así sucesivamente, originando sobrepresiones y depresiones en la tubería, la cual se dilata o contrae al paso de la onda.

El tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre la válvula y el depósito es:  $t_0 = \frac{L}{c}$ . Al cabo de un tiempo  $4t_0 = 4t = 4\frac{L}{c}$  el ciclo se repite. El proceso se repetiría indefinidamente si no existiera rozamiento en la tubería. En un caso real con rozamiento, el fenómeno se va amortiguando con el tiempo. En la *figura 4*, se detalla el proceso del golpe de ariete instantáneo durante un ciclo completo.

Figura 4. Esquema del proceso de golpe de ariete.



Fuente: (Mataix, 1986) - pág. 314

- (1) No hay perturbación. Régimen permanente. El líquido en la tubería se desplaza con velocidad  $v$  desde el depósito a la válvula. Diámetro de la tubería normal,  $D$ .
- (2) Tiempo 0. La válvula se cierra instantáneamente. La velocidad del líquido se anula a partir de la válvula, no instantáneamente, en toda la tubería.
- (3) Tiempo  $t_0 = 0.5 \frac{L}{c}$ . La onda de presión se ha propagado hacia el depósito con celeridad  $c$  y el frente de onda ha llegado a la mitad de la tubería. Mitad derecha de la tubería dilatada por la sobrepresión. Mitad izquierda, diámetro normal. En esa mitad izquierda el agua sigue circulando con velocidad  $v$  hacia la válvula. En la mitad derecha,  $v=0$ . El fluido se ha comprimido en contra de la válvula.
- (4) Tiempo  $t_0 = \frac{L}{c}$ . La onda de presión ha llegado al depósito. En toda la tubería el líquido está en reposo  $v=0$ , pero no en equilibrio, pues se encuentra comprimido. Toda la tubería está dilatada. Como un resorte que se recupera tras la

compresión, el agua de la tubería comienza a moverse con velocidad  $v$ , pero dirigida en sentido contrario, hacia el depósito. El líquido comienza a ponerse en movimiento en las rodajas inmediatas.

- (5) Tiempo  $t_0 = 1.5 \frac{L}{c}$ . La mitad izquierda de la tubería se ha contraído a su diámetro normal. La onda sigue propagándose hacia la derecha con velocidad  $c$ . En la mitad izquierda de la tubería el fluido circula con velocidad  $v$ .
- (6) Tiempo  $t_0 = 2 \frac{L}{c}$ . Diámetro de toda la tubería normal. Todo el fluido de la tubería en movimiento desde la válvula hacia el depósito con velocidad  $v$ . No hay sobrepresión en ninguna parte de la tubería, pero por la inercia, la presión continúa disminuyendo, la onda elástica se sigue propagando, ahora con depresión desde la válvula hacia el depósito con la velocidad  $c$ : el diámetro de la tubería irá disminuyendo por debajo de su diámetro normal.
- (7) Tiempo  $t_0 = 2.5 \frac{L}{c}$ . La depresión ha alcanzado la mitad de la tubería. La mitad de la derecha contiene agua en reposo y a una presión por debajo de lo normal. El diámetro de la tubería en esta mitad es inferior al normal.
- (8) Tiempo  $t_0 = 3 \frac{L}{c}$ . El agua en toda la tubería está en reposo; pero no en equilibrio, y el agua inicia su movimiento desde el depósito a la válvula con velocidad  $v$ , dirigida hacia la derecha. La depresión reina en toda la tubería. El diámetro de toda la tubería es inferior al normal.
- (9) Tiempo  $t_0 = 3.5 \frac{L}{c}$ . En la mitad izquierda de la tubería el fluido está en movimiento con velocidad  $v$  hacia la válvula. En la mitad derecha, el líquido continúa en reposo y en depresión. El diámetro de la parte izquierda es normal. El de la mitad derecha menor que el normal;  $c$  y  $v$  tienen el mismo sentido.
- (10) Tiempo  $t_0 = 4 \frac{L}{c}$ . Diámetro de la tubería normal. Todo el fluido en movimiento con velocidad  $v$  hacia la válvula. Todo igual que el tiempo 0, así el período de este movimiento es cuatro veces  $t_0$ .  $T = 4t_0 = 4 \frac{L}{c}$ .

## 2.2 Consecuencias del golpe de ariete

Este fenómeno es muy peligroso, ya que la sobrepresión generada puede llegar a superar de 60 hasta 100 veces la presión normal de la tubería, ocasionando:

- Falla de turbinas y bombas.
- Ruptura de tubería, grifos, válvulas y accesorios.

Esto puede ser visto como una “onda” de presión que se forma lentamente dentro del sistema. Ambos, golpe de ariete y oscilación, se refieren a presiones transitorias. Si no se controlan, ambas darán los mismos resultados: la *figura 5*, representa los daños a las tuberías, accesorios y válvulas, causando fugas y reduciendo la vida útil del sistema, ni la tubería ni el agua se comprimirán para absorber el choque del agua.

Figura 5. Tuberías y accesorios destruidos por un golpe de ariete.



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Golpe\\_de\\_ariete](http://es.wikipedia.org/wiki/Golpe_de_ariete)

Las condiciones de operación de un sistema de transporte de agua casi nunca están en un estado constante. Las presiones y los flujos cambian continuamente a medida que la bomba se enciende y se apaga, la demanda fluctúa y los niveles del tanque cambian. Adicionalmente a estos eventos normales existen acontecimientos imprevistos tales como interrupciones de energía y el mal funcionamiento de los equipos, lo que puede cambiar rápidamente las condiciones de operación de un sistema.

El aire atrapado o los cambios de temperatura del agua también pueden causar excesiva presión en las líneas de agua. El aire atrapado en la línea se comprimirá y ejercerá una presión extra en el agua.

Las causas del golpe de ariete son muy variadas. Sin embargo existen cuatro eventos comunes que típicamente inducen grandes cambios de presión:

- a) El arranque de la bomba puede inducir un colapso rápido del espacio vacío que existe aguas abajo de la bomba.
- b) Un fallo de potencia en la bomba puede crear un cambio rápido en la energía de suministro del flujo, lo que causa un aumento de la presión en el lado de succión y una disminución de presión en el lado de la descarga.

- c) La abertura y cierre de la válvula es fundamental para una operación segura de la tubería.
- d) Las operaciones inapropiadas o la incorporación de dispositivos de protección de las oscilaciones de presión pueden hacer más daño que beneficio.

## 2.3 Sistemas de control del golpe de ariete

Para la reducción del golpe de ariete se tienen, básicamente, dos posibilidades: bien actuar sobre la fuente que produce la perturbación, o bien reducirla una vez que ésta se ha producido. El primer sistema es el más aconsejable, pero no siempre es posible su aplicación.

### 2.3.1 Controles que actúan sobre la fuente.

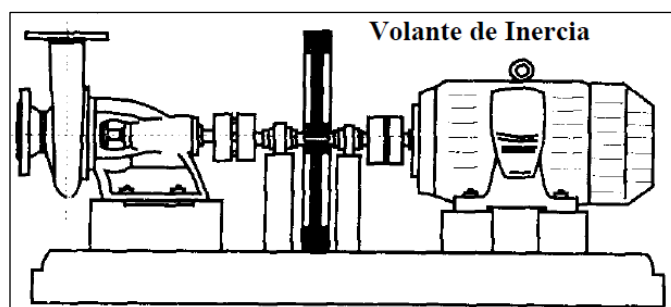
- Aumentar los tiempos de apertura y cierre de las válvulas.
- Incrementar la inercia de bombas y turbinas.
- Evitar vibraciones fluido dinámicas y posibles resonancias.

### 2.3.2 Controles que actúan sobre la perturbación.

#### 2.3.2.1 Dispositivos de acción directa.

- *Volantes de inercia.* Cuando un grupo de bombeo se desconecta por cualquier razón, programada o accidental, por inercia la bomba sigue girando disminuyendo progresivamente su velocidad hasta que esta se para, ver figura 6. A medida que el rodete disminuye su velocidad, el caudal trasegado por la misma también disminuye, originando un transitorio en la instalación, y el correspondiente golpe de ariete con el cierre de la válvula de retención.

Figura 6. Instalación de un volante de inercia.

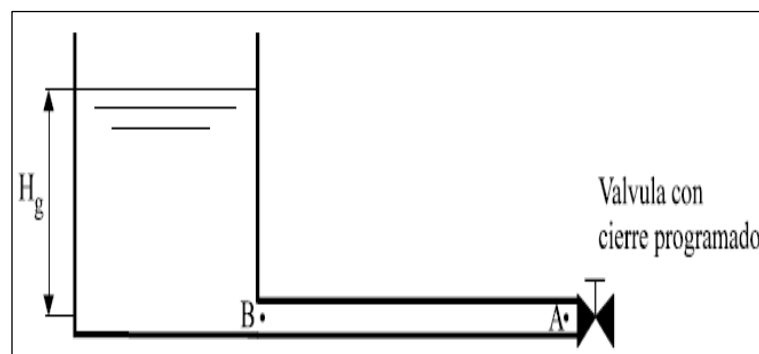


Fuente: [http://www.amf.uji.es/Teoria\\_Tema12\\_910.pdf](http://www.amf.uji.es/Teoria_Tema12_910.pdf)

- *Válvulas de retención.* La utilización de estas válvulas como sistema antiariete no es aconsejable, ya que producen perturbaciones más que mitigarlas. En general su uso es muy difundido en las estaciones de bombeo ya que evita el refluo que puede deteriorar el equipo de bombeo, pero siempre con otro uso final que el de sistema antiariete. Con el uso exclusivo de sistema antiariete se utiliza instalado como bypass.
- *Válvulas de cierre programadas.* En función de cómo se cierre la válvula y en cuanto tiempo, se producirá una oscilación en la presión más o menos brusca en la tubería. Así se trata de determinar cuál será la forma y el tiempo que hagan que el pico de presión no sobrepase unos umbrales prefijados en la instalación.

Resulta obvio que si el tiempo de cierre es muy elevado, ver *figura 7*, no se producirá apenas sobrepresión, pero la de regulación de la válvula se ve muy deteriorada, por lo que no siempre se va a poder evitar el tener que cerrar una válvula lo más rápidamente, se trata de buscar un compromiso de tal manera que aunque se produzca una onda, esta no pase de ciertos límites.

Figura 7. Instalación de una válvula con cierre programado.



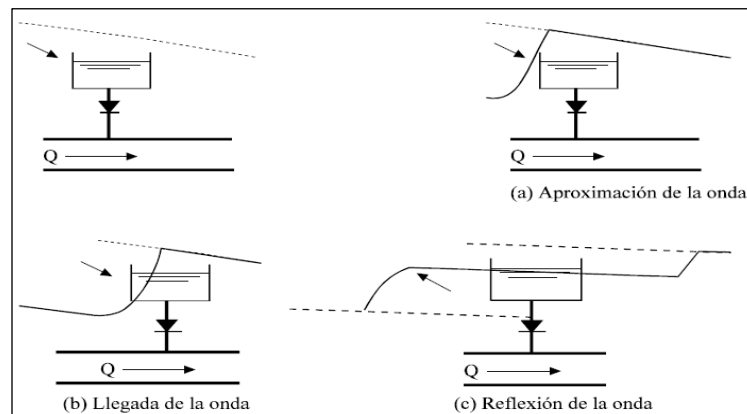
Fuente: [http://www.amf.uji.es/Teoria\\_Tema12\\_910.pdf](http://www.amf.uji.es/Teoria_Tema12_910.pdf)

### 2.3.3 Dispositivos de acción indirecta

- *Chimeneas de equilibrio.* La chimenea de equilibrio no es más que una tubería de sección mucho mayor que la tubería del sistema, y cuya única misión es aportar o acumular agua durante el transitorio, o lo que es lo mismo actúa aumentando la inercia. Este tema se tratará detalladamente más adelante.
- *Depósitos unidireccionales.* El depósito unidireccional es muy semejante a la chimenea de equilibrio, con la diferencia que en la unión con la tubería lleva una válvula

unidireccional, lo que hace que desde el punto de vista del funcionamiento sea totalmente distinto, ya que en este el nivel del tanque puede estar por debajo del nivel de cotas piezométricas, ver figura 8. La misión del tanque unidireccional es la de evitar la cavitación en puntos elevados o complicados de la tubería, aportando fluido cuando la cota de alturas piezométricas esté por debajo la cota de la superficie del depósito.

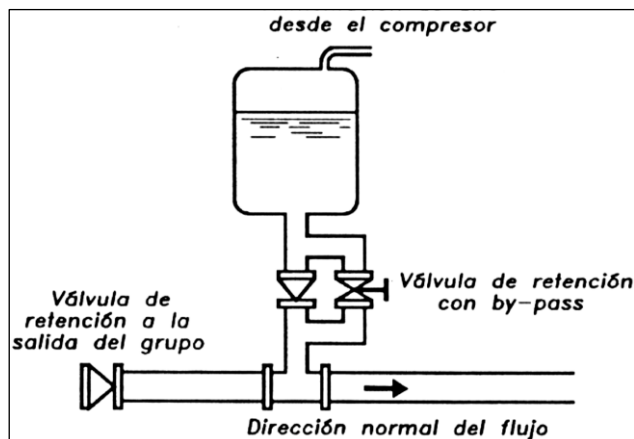
Figura 8. Depósitos unidireccionales por debajo de las alturas piezométricas.



Fuente: [http://www.amf.uji.es/Teoria\\_Tema12\\_910.pdf](http://www.amf.uji.es/Teoria_Tema12_910.pdf)

- **Calderines de aire.** Es un dispositivo de uso muy extendido para la protección de transitorios, sobre todo en la protección de instalaciones de bombeo por fallo de suministro eléctrico. La misma está lleno de aire comprimido y agua, cuando cae la red eléctrica, el calderín está lleno de energía en forma de presión, la cual se va descargando a la red a medida que el aire se expande, inyectando el fluido en la red. Por tanto, el calderín lo que hace es mantener el caudal en la red, disminuyendo lo más lentamente que sin su presencia.

Figura 9. Esquema de un calderín de aire.

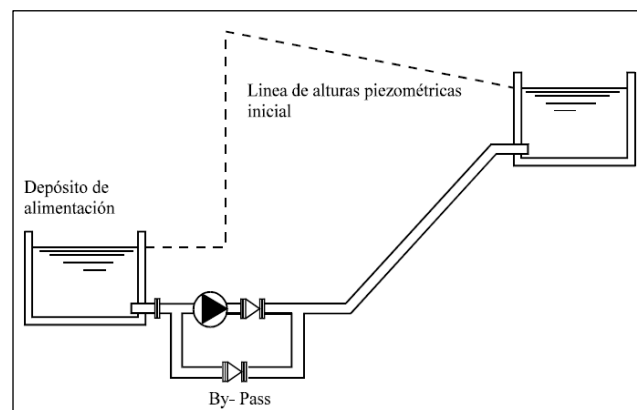


Fuente: [http://www.amf.uji.es/Teoria\\_Tema12\\_910.pdf](http://www.amf.uji.es/Teoria_Tema12_910.pdf)

El calderín se coloca tan cerca cómo se pueda de la estación de bombeo, pero siempre tras una válvula de retención para evitar el reflujo a las bombas. Está diseñado para perfiles con mucha pendiente, es muy eficaz, pero resulta bastante caro, por lo que necesita un compresor para controlar la presión del aire y un sistema de monitorización.

- *By-pass*. La instalación de by - pass de la figura 10, se realiza en el grupo motor–bomba donde se dispone de cierto nivel de presión en la aspiración. Al producir el fallo de las bombas, la presión comienza a descender aguas abajo de la válvula de retención colocado a la salida del grupo. Si la presión llega a caer por debajo del nivel del agua en el depósito del cual se alimentan las bombas, a través del by-pass se produce un flujo desde el depósito de aspiración hacia la conducción principal sin pasar por las bombas. Este aporte de caudal realiza una función de control similar a la que haría un tanque unidireccional instalado en dicho punto. En definitiva, se consigue evitar que las depresiones en el tramo inicial aguas abajo del grupo lleguen a ser de importancia. También es importante la presencia de la válvula de retención en el by-pass, que impide la descarga de la bomba hacia el propio depósito de aspiración, evitando así que la máquina funcione en circuito cerrado.

Figura 10. Instalación de un by - pass junto a la bomba.



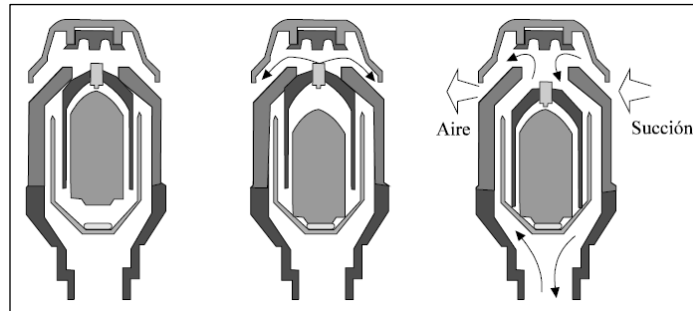
Fuente: [http://www.amf.uji.es/Teoria\\_Tema12\\_910.pdf](http://www.amf.uji.es/Teoria_Tema12_910.pdf)

- *Ventosas*. Para realizar un control inicial de las sobrepresiones es la ventosa, que permite la admisión de aire atmosférico en la conducción en el punto de la tubería en que se encuentra instalado, cuando la presión en la conducción se sitúa por debajo de la presión atmosférica rompiéndose con ello el vacío parcial que se tenía. Cuando la presión aumenta hasta superar la presión exterior, el aire es expulsado de manera que las columnas de líquido separadas por la interfase gas, vuelven a juntarse de nuevo.



La *figura 11*, muestra el principio de funcionamiento de una ventosa de admisión/expulsión con el flotador interno en las distintas posiciones con relación de la presión interna  $P_i$ , y la presión exterior  $P_{at}$ .

Figura 11. Ventosa para control de transitorios.

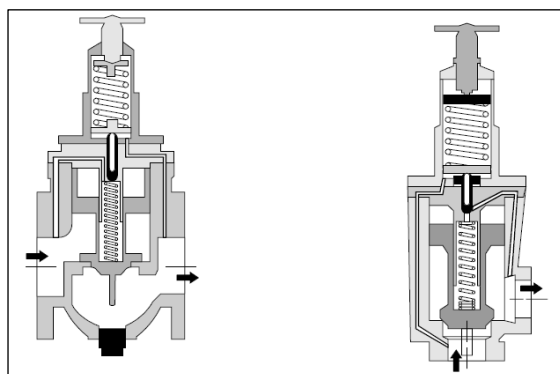


Fuente: [http://www.amf.uji.es/Teoria\\_Tema12\\_910.pdf](http://www.amf.uji.es/Teoria_Tema12_910.pdf)

- *Válvulas de alivio.* Las válvulas de alivio permiten controlar la presión máxima que puede llegar a alcanzarse en fases siguiente del transitorio. Existen diferentes diseños, como son: de muelle, contrapesadas, con pilotajes y posibilidad de regulación. La válvula de alivio de resorte es relativamente económica y segura, se abre cuando la presión en la conducción alcanza un valor entre un 10 y un 20% superior a la presión de régimen. Los problemas que presentan en este tipo de válvulas son el clapeteo y también la posibilidad de generar nuevo transitorio en la conducción cuando la válvula se cierra.

El clapeteo, consiste en que la válvula va abriendo y cerrando continuamente, produciendo pulsos de descarga en la conducción, la misma que se puede evitar con dispositivos que permiten que éstas cierren a una presión inferior a la que se abren.

Figura 12. Esquema de dos válvulas de alivio de construcción diferente.

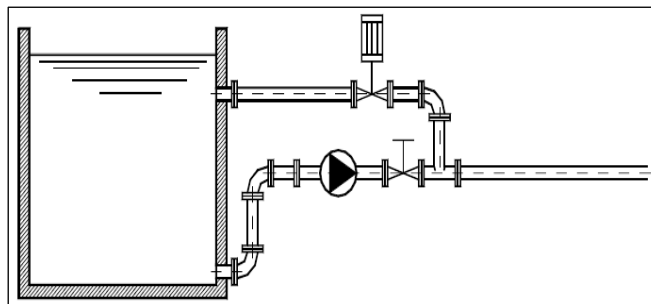


Fuente: [http://www.amf.uji.es/Teoria\\_Tema12\\_910.pdf](http://www.amf.uji.es/Teoria_Tema12_910.pdf)

- **Válvulas reguladoras de presión.** La válvula reguladora de presión (VPR) o válvula anticipadora de onda, es una válvula motorizada con una ley de apertura/cierre perfectamente diseñada para generar presión mínima en el transitorio, se trata de descargar el fluido mediante un by - pass.

La *figura 13*, muestra la instalación de una VRP, además de la válvula de descarga, cuya función es regular el punto de funcionamiento en régimen de instalación y que no es accionada durante el transitorio, solo al final cuando el fluido se haya detenido completamente, se procederá cerrar.

Figura 13. Instalación de una VRP para el control de sobrepresiones en un transitorio.



Fuente: [http://www.amf.uji.es/Teoria\\_Tema12\\_910.pdf](http://www.amf.uji.es/Teoria_Tema12_910.pdf)

La válvula reguladora de presión comenzará a maniobrase, durante la fase inicial del transitorio a fin de que al regresar la onda reflejada en el depósito encuentre esta válvula abierta y no se produzca una sobrepresión importante. La *tabla 1*, presenta un resumen de los principales sistemas de control del golpe de ariete.

Tabla 1. Sistemas de control del golpe de ariete.

| DISPOSITIVO                     | FINALIDAD                             | CONDICIONES USO   | COMENTARIOS   |
|---------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| <b>Calderines de aire</b>       | Limitar sobrepresiones y depresiones. | Más eficaz en perfiles cóncavos.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy importante el estudio de las condiciones de entrada/salida.</li> <li>• Muy eficaz pero con elevado costo.</li> <li>• Según tipo, exige mantenimiento.</li> </ul> |
| <b>Chimeneas de equilibrio</b>  | Limitar sobrepresiones y depresiones. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proteger tuberías o tramos uniformes.</li> <li>• Perfil uniforme.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• En el punto de instalación la presión debe ser muy pequeña para una altura discreta en el tanque.</li> </ul>   |
| <b>Tanques unidireccionales</b> | Limitar depresiones en puntos altos.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfiles convexo.</li> <li>• <math>(a \cdot V_o/gh) &gt; 1</math>, siendo h la altura en la sección del tanque.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy eficaces y sencillos en determinadas instalaciones.</li> <li>• Instalaciones de dispositivo de llenado.</li> </ul>   |

|                             |  |   |   |
|-----------------------------|--|---|---|
| <b>By - pass</b>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitar depresiones.</li> <li>• Paliar las limitaciones de válvula de retención a lo largo de la conducción.</li> </ul> | Perfil tubería cóncavo.   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exige que las bombas aspiren en carga.</li> <li>• Se complementa muy bien con las válvulas de alivio.</li> </ul>   |
| <b>Válvulas de alivio</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitar sobrepresiones (lo hace en forma eficaz).</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deben responder con una rápida apertura y un cierre lento.</li> <li>• Eleva altura de bombeo.</li> <li>• Perfiles cóncavos.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conllevan en ocasiones pérdida de agua.</li> <li>• Exige mantenimiento.</li> <li>• Pueden también instalarse a lo largo de conducción.</li> </ul>  |
| <b>Ventosas</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Protegen puntos altos de la tubería de las depresiones.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se instalan en conductos de perfil muy irregular.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Importante que funcionen correctamente.</li> <li>• Exige mantenimiento.</li> <li>• Necesidad de adecuada caracterización.</li> <li>• A instalar junto a los máximos relativos de la conducción.</li> </ul> |
| <b>Válvulas reguladoras</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitan sobrepresiones y protegen el grupo elevador.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• De interés en instalaciones con elevadas potencias.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesidad de grupo electrógeno auxiliar.</li> </ul>  |

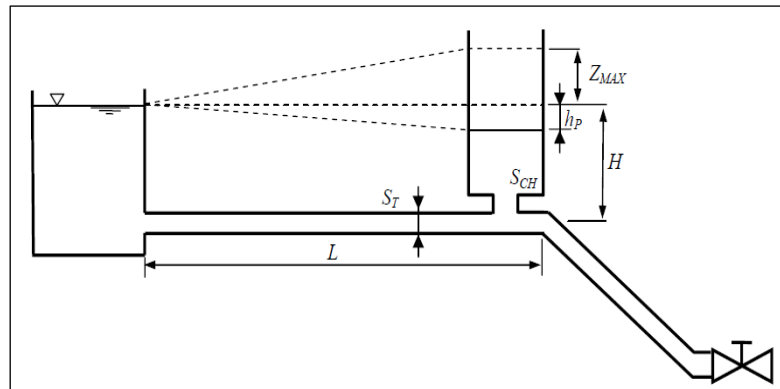
Fuente: [http://www.amf.uji.es/Teoria\\_Tema12\\_910.pdf](http://www.amf.uji.es/Teoria_Tema12_910.pdf)

## 2.4 Descripción de la chimenea de equilibrio

Las chimeneas de equilibrio, como se indica en la *figura 14*; son túneles verticales abiertos que se sitúan cerca del elemento que provoca el golpe de ariete. De esta forma, la condición de contorno se transforma en la de un depósito (no ideal), convirtiendo la pulsación de alta intensidad y frecuencia del golpe de ariete en una pulsación de baja intensidad y frecuencia, correspondiente a una oscilación en masa. Es habitual su utilización en centrales hidráulicas para proteger los túneles de hormigón anteriores a las tuberías forzadas.

Al cerrar la válvula (o los álabes distribuidores de la turbina), el agua del túnel puede entrar libremente en la chimenea, donde se para al convertir su energía cinética en energía potencial. Las chimeneas de equilibrio o tanques de oscilación, generalmente son abiertos en su parte superior y tienen una altura suficiente para evitar el derrame del agua.

Figura 14. Esquema con chimenea de equilibrio.



Fuente: [www.uniovi.es/Areas/Mecanica.../Prac03-GolpeAriete.pdf](http://www.uniovi.es/Areas/Mecanica.../Prac03-GolpeAriete.pdf)

A partir de la máxima sobrepresión como consecuencia de un cierre instantáneo (caso más desfavorable) es sencillo deducir la altura máxima de agua que se alcanzaría en ese cierre brusco:

$$Z_{m\acute{a}x.} = v \cdot \sqrt{\frac{L \cdot S_T}{g \cdot S_{CH}}} \quad (1)$$

Dónde  $S_T$  y  $S_{CH}$  son las secciones características de la tubería y de la chimenea de equilibrio respectivamente. A partir de esa ecuación, se puede calcular el período de oscilaciones originadas según:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L \cdot S_{CH}}{g \cdot S_T}} \quad (2)$$

Debe tenerse precaución con estas oscilaciones porque pueden provocar resonancias en el sistema. Para el caso de una central hidroeléctrica, Thoma definió el área mínima estable de la chimenea como:

$$S_{CH-m\acute{i}n.} = \frac{L \cdot S_T}{h_p \cdot (H - h_p)} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Dónde:

H; Altura en la chimenea en reposo.

hp; Caída de presión hasta la chimenea durante el funcionamiento normal.

Se suele diseñar la chimenea con restricción a la entrada que provoque una mayor pérdida de carga, durante la entrada y salida del agua o solamente durante la salida.

Si no existen problemas externos, se puede permitir el desbordamiento del agua por la parte superior, con lo que se puede reducir el diámetro de la chimenea. En este caso, actúa en parte como una válvula de descarga.

En cualquier caso, la chimenea debe tener las dimensiones adecuadas para evitar la entrada de aire en la tubería durante las depresiones.

En rasgos generales la chimenea de equilibrio funciona en base a la relación:

$$A_{ch}/A_{tub}.$$

Si esta relación es lo suficientemente grande, las ondas de sobrepresión o depresión, que incidan sobre la unión no se transmitirán más allá de la unión, o si lo hacen será de forma muy matizada.

#### **2.4.1** *Ventajas y desventajas de la chimenea de equilibrio*

##### **Ventajas**

- Simplicidad de funcionamiento y nulo mantenimiento.
- No necesita ningún dispositivo adicional para llenar y reponer el volumen de agua aportado durante el transitorio. Únicamente se debe tener precaución de dar a la chimenea una altura suficiente para que no rebose por la parte superior durante el arranque.
- El transitorio no se transmite aguas abajo, por lo que el tramo debajo de la misma queda perfectamente protegido sin necesidad de instalar dispositivo secundario.

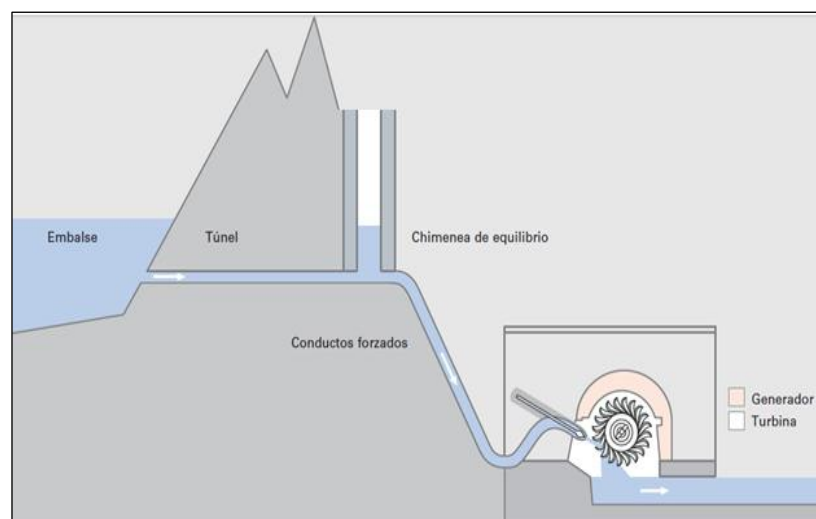
##### **Desventajas**

- Restricciones en el entorno de la chimenea, la altura de la misma debe ser superior a la altura piezométrica para el caudal máximo, y la cota inferior menor que la altura piezométrica para el caso de caudal nulo. Para evitar que se vacíe de agua durante los periodos de tiempo en que la instalación esté parada.
- Aparición de fuertes inversiones del flujo aguas arriba de la chimenea, incluso superiores a las que aparecerían si no hubiese chimenea.

## 2.5 Aplicaciones de la chimenea de equilibrio

**2.5.1 Chimenea de equilibrio en centrales hidroeléctricas.** La chimenea de equilibrio, al igual que el tanque de carga responden a variaciones en la demanda de energía, durante el arranque y la parada, por tal motivo debe disponer de un volumen para el arranque y un colchón de aire a presión atmosférica para amortiguar el golpe de ariete. Constructivamente la chimenea de equilibrio se ubica al final de PCH's en derivación con conducciones por túnel o como amortiguador del golpe de ariete en tuberías a cielo abierto, tal como se indica en la figura 15.

Figura 15. Chimenea de equilibrio en centrales hidroeléctricas.



Fuente: <http://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/hidroelectricidad.pdf>

Una Chimenea de Equilibrio se instala cuando en el caso en que los parámetros hidráulicos de la PCH cumplen la siguiente condición:

$$\frac{L}{H_B} \leq 5 \text{ ó } \frac{t_h}{V} < 0.51 \quad (4)$$

Dónde:

L: longitud de la tubería.

H<sub>B</sub>: Caída bruta.

t<sub>h</sub>: Tiempo hidráulico.

V: Velocidad del caudal en la tubería de presión.

Sin embargo la condición más general, es que si el tiempo de cierre de la directriz es menor de 3 segundos. Se requiere chimenea de equilibrio. (ORTIZ, 2001 pág. 228)

El análisis hidráulico de la chimenea de equilibrio se direcciona fundamentalmente a mitigar la sobrepresión causada por el cierre de la directriz de la tubería, la cual genera una energía cinética que eleva el nivel en la chimenea de equilibrio en  $Y_E$ .

Al igualar la variación de la energía cinética en la conducción de baja presión, con la variación de la energía potencial del agua en la chimenea de equilibrio, sin considerar las pérdidas tenemos:

$$\int_0^V \frac{m \cdot V_t}{g} \cdot dV_t = \int_0^{Y_E} \gamma \cdot y \cdot A_c \cdot dy \quad (5)$$

Dónde:

m: Masa del agua.

$V_t$ : Velocidad en la conducción.

$\gamma$ : Peso específico del agua.

y: Sobrepresión.

$A_c$ : Área de la chimenea de equilibrio.

Dado que la masa del agua es:  $m = \gamma \cdot A_t \cdot L_t$

Dónde:

$A_t$ : Área de la conducción.

$L_t$ : Longitud de la conducción.

La sobrepresión teórica del golpe de ariete es:

$$y_e = +V_t \cdot \sqrt{\frac{A_t \cdot L_t}{g \cdot A_c}} \quad (6)$$

$$y_d = -V_t \cdot \sqrt{\frac{A_t \cdot L_t}{g \cdot A_c}} \quad (7)$$

Dónde:

$A_c$ : Área de la chimenea de equilibrio.

$A_t$ : Área de la conducción.

$L_t$ : Longitud de la conducción.

$V_t$ : Velocidad del agua en la conducción.

El periodo de oscilación en la chimenea de equilibrio, está dado por:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{A_c \cdot L_t}{g \cdot A_c}} \quad (8)$$

Considerando las pérdidas de carga en la conducción, la elevación máxima ( $Y_E$ ) es:

$$Y_E = Z_e \cdot y_e \quad (9)$$

Siendo  $Z_e$ , el factor de pérdida de carga por efecto del golpe de ariete, igual a:

$$Z_e = 1 - \frac{2}{3}k + \frac{1}{9}k^2 \quad (10)$$

Cuando:

$$k_e = \frac{h_t}{y_e} \quad (11)$$

Dónde:

$h_t$ : Pérdidas de carga total en la conducción.

$$h_t = 4.098 \cdot 10^{-3} \cdot K \cdot \frac{Q^{1.9}}{D^{4.9}} \cdot l \quad (12)$$

Dónde:

D: Diámetro de la tubería.

l: Longitud de la tubería.

El valor del coeficiente K depende del material de la tubería, y se toma de la siguiente tabla.

Tabla 2. Coeficiente K para diferentes materiales.

| Material                               | K    |
|--|------|
| Tubos de acero galvanizado con acoples | 0.42 |
| Tubos de aluminio                      | 0.40 |
| Tuberías de acero nuevas               | 0.36 |
| Tuberías de fibrocemento y plásticos   | 0.32 |

Fuente: [http://www.uclm.es/area/ing\\_rural/Trans\\_hidr/Tema7.PDF](http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema7.PDF)



Para determinar la sobrepresión mínima  $Y_D$ . Se tiene:

$$Y_D = z_d * y_d \quad (13)$$

Dónde:

$y_d = Y_{\text{máx.}}$

$z_d$  = factor de pérdida de carga por efecto del golpe de ariete.

$$z_d = 1 - 0.593 * k_e^3 + 1.556 * k_e^2 - 1.683 * k_e \quad (14)$$

A partir de esa ecuación, se puede calcular el período de oscilaciones originadas según:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L \cdot S_{CH}}{g \cdot S_T}} \quad (15)$$

## 2.6 Tipos de chimenea de equilibrio

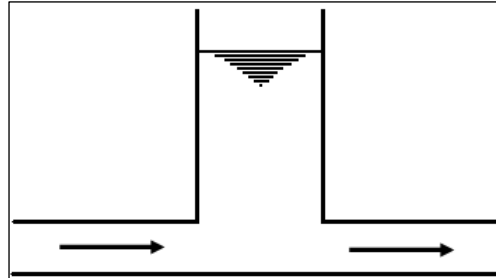
Las chimeneas de equilibrio pueden ser de varias configuraciones, dependiendo de las características y limitaciones topográficas así como el desnivel del lugar donde vayan a ser construidas o escavadas (en el caso de centrales hidroeléctricas cercanas a terrenos montañosos o rocosos), además de las necesidades hidráulicas del proyecto, propias de cada diseño en particular. Dichas configuraciones van desde simples formas cilíndricas de diámetro constante, hasta formas específicas de secciones especiales y diámetros variables a lo largo de todo el eje vertical e inclusive chimeneas hidroneumáticas o de cámaras de aire para amortiguar las oscilaciones.

**2.6.1 Chimeneas de equilibrio simples.** Las chimeneas de equilibrio simples constan de un solo conducto de diámetro constante por el que asciende el agua hasta la altura correspondiente a su presión, como se muestra en la *figura 16*, que con frecuencia es adecuado para cargas bajas.

Se coloca lo más cerca posible a la casa de máquinas con lo cual se tiene una menor longitud de la tubería de presión, además debe de encontrarse en una cota superior a la casa de máquinas, para mejorar su eficiencia, caso contrario se debe de incrementar la altura de la chimenea. Este tipo de chimeneas tiene dimensiones muy

grandes ya que requieren un gran volumen, por lo que se vuelven muy caras y no son muy utilizadas.

Figura 16. Esquema de una chimenea de equilibrio simple.



Fuente: Autores.

Este tipo de chimeneas son una práctica y excelente solución para cubrir los niveles máximo y mínimo de oscilaciones de las masas de agua si se tiene una idónea topografía en el sitio. A pesar de ello, Parmakian en 1968 afirmó que este tipo de chimeneas es el diseño más fiable dentro de los posibles diseños de protecciones contra los transientes hidráulicos y sus efectos posteriores.

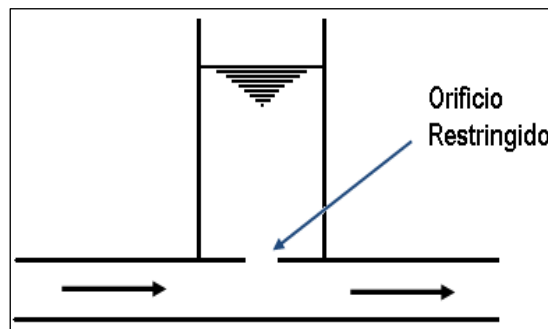
Este tipo de chimeneas tiene un alto costo inicial de excavación y recubrimiento de las paredes internas que toman contacto con el agua oscilante, debido a la gran área de la sección transversal que deberá tener en comparación con otros tipos de chimeneas, puesto que la única manera como equilibra las sobrepresiones generadas por el golpe de ariete es con la carga de agua que se tenga en ella.

**2.6.2 Chimeneas de equilibrio con orificio restringido.** Se trata de chimeneas de equilibrio simples, a las cuales se les añade un orificio restringido o estrangulamiento en la intersección entre la tubería y la chimenea como se muestra en la *figura 17*. La abertura es menor con lo cual se consigue una mayor pérdida de carga localizada, aumenta la acción amortiguadora y reduce la onda inicial.

Así, ayuda a compensar la sobrepresión generada posteriormente al golpe de ariete y reduciendo la inercia restante necesaria que deberá ser generada por una carga de agua en la chimenea, lo cual equivale a no tener que aumentar el área de la sección transversal en un valor tan grande como en una chimenea simple. Otra gran ventaja es la reducción del tiempo de respuesta ante la reducción de producción (carga o descarga de agua) de éste dispositivo frente a cómo respondería una chimenea simple. La influencia del orificio en la reducción del tiempo de reacción es evidente en

grandes variaciones de carga, pero con pequeñas, es imperceptible. Se podría contrarrestar el golpe de ariete con la máxima reducción posible del diámetro del orificio, sin embargo esto está limitado por un diámetro mínimo que permita la entrada del flujo suficiente a la chimenea, pues un orificio demasiado pequeño no tendría efecto sobre el golpe de ariete y su onda de celeridad directa.

Figura 17. Esquema de una chimenea de equilibrio con orificio restringido.



Fuente: Autores.

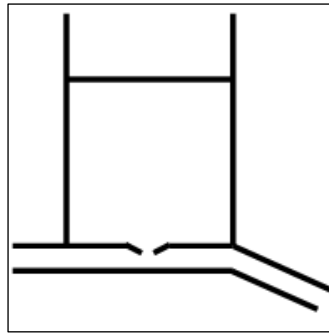
En las operaciones de cierre de válvulas, el agua es rechazada y la altura de agua que ingresa en la chimenea de equilibrio será igual a la pérdida en el orificio restringido. Si en el diseño del orificio restringido se adopta un diámetro muy grande, la chimenea de equilibrio dejará de funcionar como chimenea de orificio restringido y pasará a funcionar como una chimenea simple, caso contrario si el diámetro del orificio es muy pequeño, la carga de agua rechazada será igual al golpe de ariete producido sin la presencia de chimenea de equilibrio.

Las chimeneas con orificio restringido son mucho más eficientes y económicas que las simples, sin embargo debido a los cambios repentinos de presión en el orificio restringido no son aconsejables en instalaciones donde se tiene un costo adicional de las unidades generadoras de energía debido al incremento de inercia requerido.

**2.6.3 Chimenea de equilibrio amortiguada.** La chimenea de equilibrio amortiguada, es un tubo vertical de gran sección que está comunicado con la red a través de orificios que determinan una pérdida de carga normalmente diferente para la entrada y para la salida. (SÁNCHEZ, 2012 pág. 291)

Este tipo de sistemas *figura 18*, tiene la ventaja de tener una mayor estabilidad debido a la restricción del flujo impuesta por los orificios de comunicación con la red.

Figura 18. Esquema de una chimenea de equilibrio amortiguada.

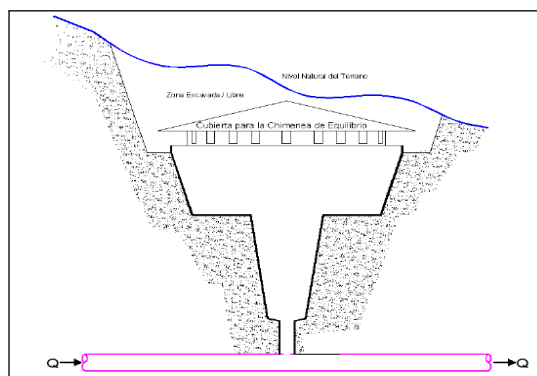


Fuente: Autores.

**2.6.4** *Chimeneas compuestas o de sección transversal variable.* Se opta por éstas cuando chimeneas de equilibrio simples o con orificio restringido, no logran evitar un posible desbordamiento del agua el momento de producirse la máxima oscilación superior (debido a las condiciones topográficas y geológicas propias del terreno), o una succión al producirse la mínima oscilación. Algunas de las formas tenemos:

- Chimenea de equilibrio compuesta con un aumento de la sección transversal en la zona superior próxima al contacto con la atmosfera en el nivel de terreno cuando la máxima oscilación hace que sobrepase el nivel superior de la tubería.

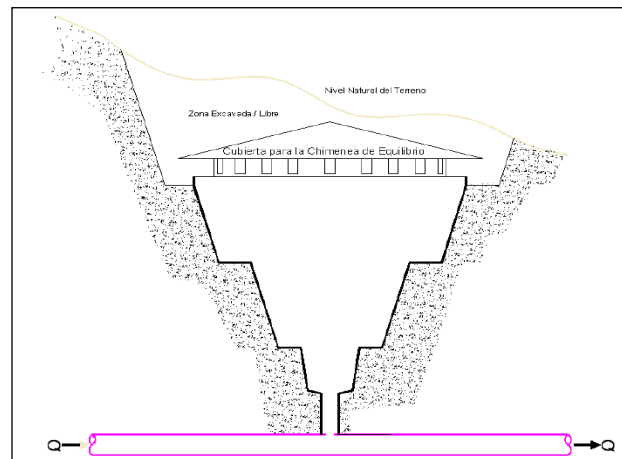
Figura 19. Esquema de una chimenea de equilibrio compuesta con aumento de la sección transversal superior.



Fuente: <http://www.bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4483/1/CD-4093.pdf>

- Chimenea de equilibrio compuesta de una tubería vertical con divisiones verticales.
- Chimenea de equilibrio compuesta de diferentes diámetros incrementándose a medida que sube a la superficie.

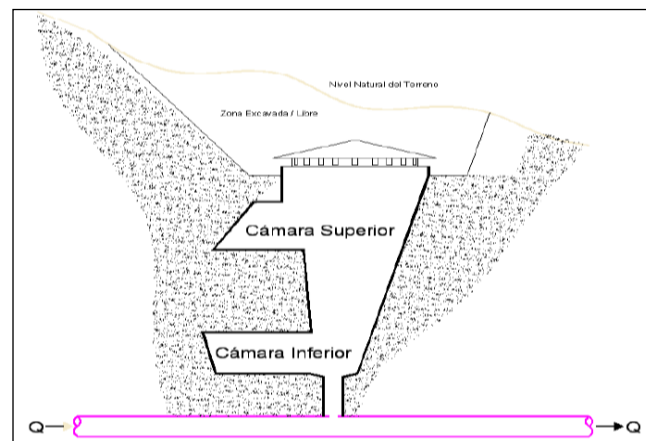
Figura 20. Esquema de una chimenea de equilibrio compuesta con aumento en la sección en diferentes zonas.



Fuente: <http://www.bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4483/1/CD-4093.pdf>

- Chimenea de equilibrio compuesta de una tubería vertical con cámaras laterales ubicadas en la parte inferior e intermedia de la tubería: las cámaras laterales inferiores cumplen la función de ser grandes reservorios de agua para evitar que se produzca una succión de la chimenea ante la oscilación mínima. Cuando se toma carga, el nivel cae velozmente hasta la cámara inferior favoreciendo la aceleración del líquido en el conducto. La cámara inferior es entonces vaciada lentamente. (CFE, 1981).

Figura 21. Esquema de una chimenea de equilibrio compuesta con cámaras laterales.



Fuente: <http://www.bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4483/1/CD-4093.pdf>

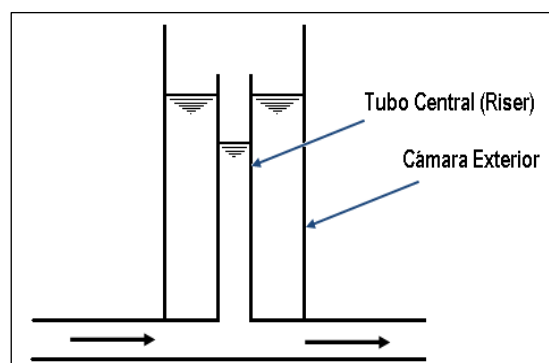
O en su efecto, estas cámaras laterales sirven igualmente de grandes reservorios para evitar que el nivel del agua suba más allá del límite superior, pues tiene el efecto de una desaceleración inmediata por su brusco cambio de sección.

Es conveniente ubicar la cámara intermedia en una posición tal que coincida con el nivel de operación normal del agua dentro de la chimenea de equilibrio (cuando no se han ejecutado maniobras bruscas y las turbinas están siendo abastecidas con el caudal de diseño). Debido a la alta carga estática en la instalación, el área requerida para la estabilidad en la cámara intermedia es pequeña. (CFE 1981)

El diseño de chimeneas compuestas, en sus diferentes formas, es viable y económico si se tiene las características geológicas adecuadas, tales que permitan una excavación en el terreno de forma relativamente sencilla y cuyo valor final no sea mayor al que se realizaría con la construcción de otro tipo de chimeneas más complejas.

**2.6.5 Chimeneas de oscilación diferencial.** Son chimeneas de equilibrio conformadas por un pozo o chimenea principal en cuyo interior existe una tubería central o “riser”, con orificios en su parte inferior, y un diámetro aproximado al del conducto (80% como mínimo), (CFE 1981). La función de ésta tubería central es desacelerar al líquido que entra en su interior rápidamente, al mismo tiempo que éste circula lentamente en la chimenea principal. El orificio superior del riser tiene la función de, una vez que el agua alcance su nivel, verter el líquido hacia la chimenea principal y de ésta manera mantener constante la carga en el túnel de baja presión. Su esquema se observa en la figura 22.

Figura 22. Esquema de una chimenea de equilibrio diferencial.



Fuente: Autores.

En maniobras bruscas de apertura de válvulas, donde el túnel de baja presión tiene una alta demanda de agua, y con chimenea de oscilación diferencial, su riser proporciona aceleradamente el líquido necesario hacia la tubería de presión;

paralelamente en maniobras de apertura leves, la chimenea principal proporciona el agua necesaria a suministrarse para la tubería de presión.

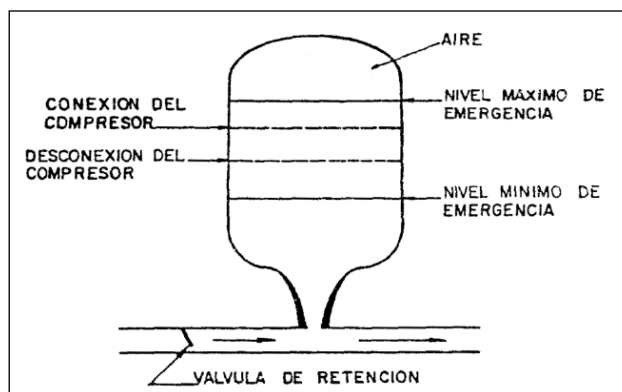
Su principal ventaja y la razón para su nombre, es que las funciones de suministro y de almacenamiento se separan en forma más efectiva de las funciones de aceleración del líquido en el conducto. (CFE, 1981)

Tiene una mayor agilidad o menor tiempo de respuesta a régimen, debido a la pequeña sección del tubo central, como también la posibilidad de atender a grandes demandas de flujo suministradas por el tubo exterior, comparando con las chimeneas simples o las de orificio restringido.

**2.6.6** *Chimeneas de equilibrio de aire o neumática.* A diferencia de los otros tipos de chimeneas que tienen en su parte superior un contacto libre con la atmósfera, éste tipo de chimeneas se encuentran cerradas y únicamente llenas con un volumen de aire que se comprime en casos en que el nivel de agua aumente en la chimenea y se lo descomprime en casos que éste disminuya.

El tanque no necesita ser tan alto como un tanque simple de oscilación, como se muestra en la *figura 23*.

Figura 23. Esquema de una chimenea de equilibrio neumática.



Fuente: <http://www.bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4483/1/CD-4093.pdf>

Este tipo de chimeneas tienen un costo adicional correspondiente a la zona neumática (con requerimientos adicionales de tamaño, compresores de aire) y por ende solamente se las debe poner a consideración si los otros tipos de chimeneas resultan de una instalación difícil o poco económica.

Los tanques de oscilación descubiertos, generalmente se construyen de acero o de concreto reforzados y en climas fríos debe estar protegido de la congelación y, para este fin se emplean unidades eléctricas de calefacción.

## 2.7 Variables y ecuaciones del golpe de ariete

**2.7.1 Cierre total o parcial en una tubería elástica.** Al cierre instantáneo de la válvula, el fluido sufre una brusca deceleración, de forma que se genera una fuerza de inercia, según:

$$F_i = -m \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (16)$$

Dónde:

$\Delta t$ : es el tiempo finito que ha transcurrido para que una cierta masa,  $m=\rho lA$ , que ocupa una longitud finita de tubería ( $\Delta t$  no es el tiempo de cierre de válvula ya que por hipótesis,  $t_c=0$ ), reduzca su valor un cierto valor finito  $\Delta v$ .

En el cierre total:  $\Delta v = -v$

En el cierre parcial:  $\Delta v = v' - v$  (donde  $v'$  es la velocidad final del fluido).

$t_c$ : es el tiempo de cierre de la válvula.

Agrupando estas consideraciones en la expresión de la fuerza de inercia, y teniendo en cuenta que la sobrepresión quede definida por  $\Delta p = F_i / A$  y que, evidentemente, la celeridad de la onda es  $a=l/\Delta t$ , se obtienen las fórmulas de Joukowski:

$$\Delta p = \rho a v \quad (\text{Sobrepresión en cierre instantáneo total de la válvula}) \quad (17)$$

$$\Delta p = \rho a (v - v') \quad (\text{Sobrepresión en cierre instantáneo parcial de la válvula}) \quad (18)$$

**2.7.2 Propagación de ondas de velocidad y presión.** Joukowski también fue el primero en desarrollar una expresión para el cálculo de la velocidad de onda en función de los parámetros de la instalación. En definitiva:

$$c = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{KD}{E\delta}}} \quad (19)$$



Dónde:

c: es la celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería, [m/s] – SI.

K: es el módulo de elasticidad del fluido (módulo de Bulk), [N/m<sup>2</sup>] – SI.

ρ: es la densidad del líquido, [kg/m<sup>3</sup>] – SI.

D: es el diámetro de la tubería, [m] – SI.

E: es el módulo de elasticidad de la tubería, [N/m<sup>2</sup>] – SI.

δ: es el espesor de la tubería, [m] – SI.

El numerador de la ecuación (19) es la celeridad de la onda elástica en el fluido. Algunos autores como Mataix la denotan como  $a_0$ . Para el agua,  $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$  y  $K = 2.03 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ , este valor es:

$$a_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = 1425 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (20)$$

Nótese que si el material pudiera ser inelástico ( $E \rightarrow \infty$ ) y/o la tubería tuviera mucho espesor, el denominador de la ecuación (19) sería la unidad, por lo que  $a_0 \rightarrow a$ . Lógicamente, en la realidad:  $a_0 < a$ .

En la *tabla 3*, se recogen algunos valores típicos del módulo de elasticidad para diversos materiales de conductos:

Tabla 3. Valores del módulo de elasticidad.

| Módulo de elasticidad | Ex10 <sup>9</sup> [N/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------------|---------------------------------------|
| Acero                 | 200                                   |
| Aluminio              | 70                                    |
| Vidrio                | 65                                    |
| Hormigón              | 30                                    |
| Madera                | 13                                    |
| Hueso                 | 9                                     |
| Poliéstereno          | 48                                    |

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/permot3.html>

**2.7.3** *Presión máxima en cierre total, lento y uniforme de la válvula.* En una primera aproximación, se va a suponer que la tubería es rígida (inelástica) y que el cierre de la válvula es uniforme. Retomando la expresión de la fuerza de inercia del inciso 2.7.1, en términos de presión, dice que:

$$\Delta p = -\rho L \frac{dv}{dt} \quad (21)$$

Como se supone un movimiento uniforme, entonces, directamente se puede expresar:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0 - v}{t_c} = -\frac{v}{t_c}$$

Por tanto:

$$\Delta p = \rho L \frac{v}{t_c} \quad (22)$$

Modificando esta fórmula con un coeficiente  $k$  que está comprendido entre 1 y 2, para tener en cuenta el efecto de la elasticidad de la tubería, se obtiene en definitiva:

$$\Delta p = k \frac{\rho L v}{t_c} \text{ (Sobrepresión en cierre lento y total de la válvula en tubería elástica)} \quad (23)$$

Esta ecuación rige el proceso en la mayoría de los casos. El peligro del golpe de ariete en una instalación es mayor:

- Cuanto mayor sea la longitud de la tubería (por ejemplo, una tubería forzada desde la turbina al embalse).
- Cuanto mayor sea la velocidad del líquido en la tubería.
- Cuanto más rápido sea el cierre de la válvula (por ejemplo, el cierre demasiado rápido del inyector de una turbina Pelton puede producir el golpe de ariete).

**2.7.4 Tubería de característica variable.** Una instalación puede estar formada por tuberías de varios diámetros o de un mismo diámetro, con espesores diferentes. El cálculo exacto del golpe de ariete es complejo. Sin embargo, puede hacerse un cálculo aproximado utilizando velocidades medias de la onda y del flujo. Designando por  $L_1, L_2, \dots, L_n$  a las distintas longitudes con material, espesor y/o diámetro distinto;  $a_1, a_2, \dots, a_n$  a las celeridades respectivas de la onda y  $t_1, t_2, \dots, t_n$  a los tiempos que tarda la onda en recorrer dichos tramos, el tiempo total que tarda se obtiene como:

$$t = \frac{L}{a} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{a_i} \quad (24)$$

De aquí se despeja la velocidad de onda equivalente para toda la conducción:

$$a = \frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{c_i}} \quad (25)$$

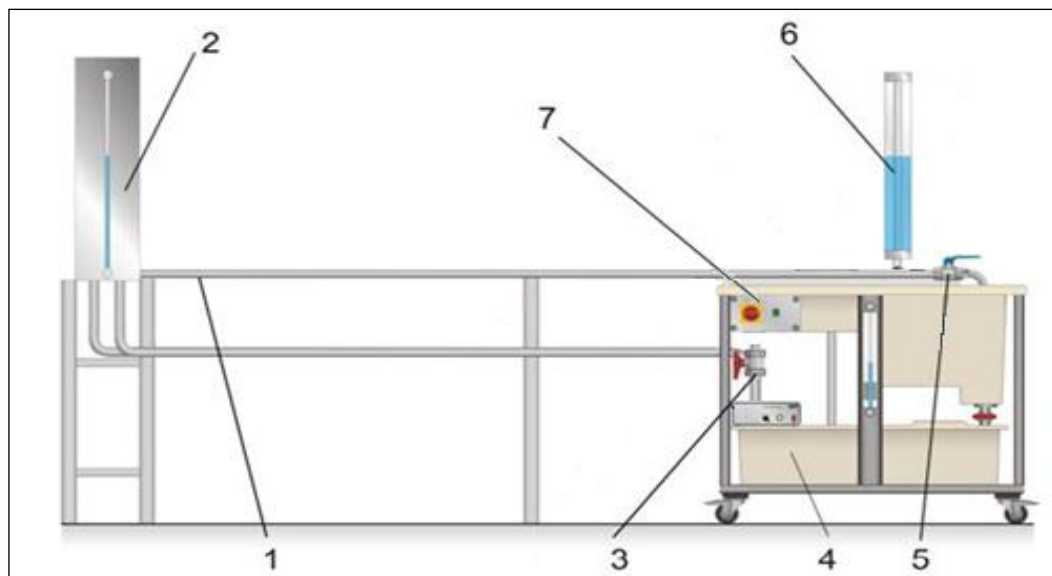
En el caso de que el diámetro de la tubería sea diferente en diversos tramos, también es necesario recalcular la velocidad equivalente del flujo. De forma análoga como se ha planteado en la ecuación (25), se obtiene:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n L_i v_i}{L} \quad (26)$$

## 2.8 Banco de pruebas chimenea de equilibrio

Con el banco de ensayos *figura 24*, se generan y visualizan golpes de ariete en tuberías y se demuestra el funcionamiento de una chimenea de equilibrio.

Figura 24. Esquema de una chimenea de equilibrio.



Fuente: [http://www.gunt.de/static/s3190\\_3.php#](http://www.gunt.de/static/s3190_3.php#)

Dos tramos de tubo ubicados en paralelo (1). El banco de pruebas está provisto de un tramo de tubo con grifo de bola y chimenea de equilibrio, y de un segundo tramo con válvula de impacto. La llegada del fluido al punto de consumo o de salida se hace por

sistemas de redes distribuidas que presentan múltiples problemas correspondientes con la selección de diámetros de tubería, caudales y distribución homogénea de la presión. En los sistemas de distribución se producen grandes pérdidas si no son seleccionadas e instaladas adecuadamente.

Depósito (2). El depósito es un reservorio circular, destinado a almacenar un fluido a nivel constante para simular la caída de agua de una presa hidroeléctrica. Además está provisto de un tubo interior que está conectado al desagüe para que cuando el fluido llegue hasta el nivel requerido el mismo sea desviado al reservorio manteniendo de esta manera el nivel.

Tubería de retorno del depósito (3). El desagüe en un sistema de tubería que retorna el excedente de fluido al reservorio, para que no supere el nivel requerido y se mantenga constante. El sistema de desagüe está unido al depósito por un extremo y al reservorio por el otro. Además el material del desagüe no es influyente, de esta manera se tiene la libertad de utilizar cualesquier material, lo que sí es de gran importancia es el diámetro que debe ser lo suficientemente amplio para permitir el paso del fluido de exceso.

Unidad de alimentación (4). La unidad de alimentación se encarga del suministro de agua y de la medición del caudal, y está constituida por una bomba centrífuga que es una máquina generadora, ya que absorbe energía mecánica y la convierte en energía hidrodinámica e incrementa la energía del fluido. Se encarga también de mantener el flujo continuo del fluido para que el nivel en el depósito sea constante.

Grifo de bola/válvula de retención (5). Grifo de bola. Es un elemento mecánico se emplea para regular, permitir o impedir el paso de un fluido a través de una instalación industrial o máquina de cualquier tipo. En la válvula o grifo de bola un macho esférico agujereado controla la circulación del líquido. El sellado en los grifos de bola es excelente, la bola contacta de forma circunferencial y uniforme el asiento el cual es de un material blando.

Válvula de retención. También conocidas como válvulas check o válvulas de contraflujo. Las guías tienen el propósito de ayudar en selección de válvulas de retención más adecuadas para el proyecto. Las válvulas de retención tienen como propósito permitir el flujo en un sólo sentido.

Chimenea de equilibrio (6). La chimenea de equilibrio es un túnel vertical abierto que se sitúa cerca del elemento que provoca el golpe de ariete, como son las válvulas. De esta manera, la posición de contorno se transforma en la de un depósito, convirtiendo la pulsación de presión de alta intensidad y frecuencia en una pulsación de baja intensidad y frecuencia, propio de una oscilación en masa.

Equipo de mando (7). El equipo de mando está formado por las botoneras de control e incluye el cableado eléctrico. El equipo de mando al momento se compone de la botonera de encendido/apagado de la bomba.

## **2.9 Automatización y su importancia**

**2.9.1** *Concepto de automatización.* La automatización viene del término griego antiguo auto, guiado por uno mismo o medios propios, es decir, en el que la materia, información o energía es cambiado o transformado sustituyendo a operadores humanos.

La automatización como una disciplina de la ingeniería, es la tecnología más amplia que un mero sistema de control, que trata de la aplicación de sistemas mecánicos, electrónicos, la instrumentación industrial que incluye los sensores, los transmisores de campo, los sistemas de control y supervisión, los sistemas de transmisión y recolección de datos y las aplicaciones de software en tiempo real para supervisar, controlar las operaciones de plantas o procesos industriales.

**2.9.2** *Importancia de la automatización.* Hoy en día y gracias al desarrollo de nuevos avances de la tecnología, el control de las máquinas y sistemas en las industrias son cada vez más automatizadas, que se ha convertido en el área más innovadora, por la cual las razones para la automatización son:

- Incrementa la productividad.
- Alto costo de mano de obra.
- Mano de obra escasa.
- Tendencia de mano de obra con respecto al sector de servicios.
- Seguridad.
- Alto costo de materiales en bruto.
- Mejora la calidad del producto.
- Reduce el tiempo de manufactura.

- Reducción del proceso de inventarios.
- Alto costo de la no automatización.

**2.9.3 Tipos de automatización.** En la actualidad existen cinco formas de automatizar una industria moderna, de modo que se deberá analizar cada situación para decidir correctamente el esquema más adecuado como son:

- La automatización fija.
- La automatización flexible.
- Control automático de procesos.
- El procesamiento electrónico de datos.
- El control numérico computarizado.

**2.9.3.1 La automatización fija.** Es un sistema en el cual la secuencia de las operaciones de proceso o ensamble está determinada por la configuración del equipo. Las características típicas son: fuerte inversión inicial para equipo de ingeniería, altos índices de producción y relativamente inflexible en adaptarse a cambios en el producto.

**2.9.3.2 La automatización flexible.** Consiste en procesos automáticos, reprogramables con mucha agilidad y con cambio muy rápido de herramientas, que puede producir una variedad de productos o partes sin pérdida de tiempo para cambios entre un producto y el siguiente. El sistema puede producir varias combinaciones y programaciones de productos, en lugar de hacer en lotes separados.

**2.9.3.3 El control automático de procesos.** Se refiere usualmente al manejo de procesos caracterizados de diversos tipos de cambios (generalmente químicos y físicos); por ejemplo el proceso de refinación de petróleo. El uso de las computadoras analógicas y digitales ha posibilitado la aplicación de ideas de control automático a sistemas físicos que hace apenas pocos años eran imposibles de analizar o controlar.

**2.9.3.4 El procesamiento electrónico de datos (PED).** Puede manejar un gran número de diversas tareas, desde procesar una sencilla nomina hasta simular los efectos que diferentes alternativas de decisión producirían en todas las operaciones de una empresa. El equipo de PED proporciona al auditor una poderosa herramienta para aumentar la efectividad de sus procedimientos de auditoría.

**2.9.3.5** *El control numérico computarizado (CNC).* Es un sistema de automatización de máquinas herramienta operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento o dispositivo capaz de dirigir el posicionamiento de un órgano mecánico móvil mediante órdenes elaboradas de forma totalmente automática a partir de información numérica en tiempo real.

**2.9.4** *Técnicas de automatización.* De acuerdo a su naturaleza se clasifican en:

**2.9.4.1** *Automatización mecánica.* Este tipo de automatización se utiliza principalmente para sustituir las acciones humanas en la cual los sistemas mecánicos son complicados por la cantidad de mecanismos y de escasa flexibilidad. La tecnología que regula su funcionamiento es relativamente accesible al personal poco calificado en el montaje y mantenimiento.

**2.9.4.2** *Automatización neumática.* Esta técnica se utiliza en el campo de máquinas herramientas que utilizan el aire comprimido para trabajar, como son en trabajos de fijación de piezas, bloqueos de órganos, alimentación de máquinas y movimiento lineal de órganos que no requieren velocidades constantes.

**2.9.4.3** *Automatización hidráulica.* Tiene similar función a la automatización neumática, además la hidráulica se requiere en sistemas que desarrollan más trabajo y no sea primordial la velocidad de respuesta, con mandos por ejemplo; en prensas, en máquinas herramientas, en frenos de automóviles, dirección y suspensión.

**2.9.4.4** *Automatización eléctrica.* Cualquier máquina por sencilla que sea, va a tener algún tipo de automatismo eléctrico, para gobernar motores o función de mando dentro de la propia máquina.

**2.9.4.5** *Automatización electrónica.* La electrónica es el campo de la ingeniería y de física aplicada relativo al diseño y aplicación de dispositivos, como en circuitos electrónicos, cuyo funcionamiento depende del flujo de electrones para la generación, transmisión, recepción, almacenamiento de información, entre otros.

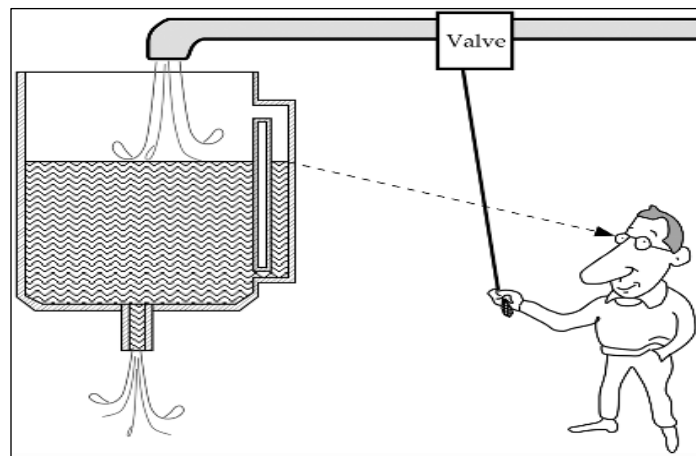
Donde la información puede consistir en voz o música como en un receptor de radio, en una imagen en una pantalla de televisión, o en números u otros datos en un computador.

## 2.10 Descripción de medición de variables

**2.10.1 Definición del sensor.** Un sensor se define a menudo como un dispositivo que recibe y responde a una señal o estímulo. (FRADEN, 2004 pág. 20)

Esta definición es tan amplia que abarca casi todo, por ejemplo, el control del nivel de la *figura 25*, cuando el operador ajusta el nivel de líquido en el tanque mediante la manipulación de su válvula.

Figura 25. Sistema de control de nivel.



Fuente: (Fraden, 2004) - pág. 2

Para actuar de manera adecuada, el operador debe obtener información sobre el nivel de líquido en el tanque en el momento oportuno. Se entiende, el estímulo como la cantidad, posición económica o condición que se detecta y se convierte en señal eléctrica. De otra forma se define un **sensor** como un dispositivo que, convierte un fenómeno físico tal como la temperatura, presión, nivel, longitud, posición, o la presencia o ausencia, en una tensión, corriente, frecuencia, pulsos, y así sucesivamente. (SOLOMAN, 2010 pág. 180)

**2.10.2 Definición del transductor.** El transductor es un dispositivo, convertidor de un tipo de energía en otra. Convierte una señal de una forma física determinada en otra señal de forma física diferente.

Un ejemplo de un transductor es un altavoz que convierte una señal eléctrica en un campo magnético variable y, posteriormente, en acústica. Los transductores pueden ser utilizados como actuadores en diversos sistemas.



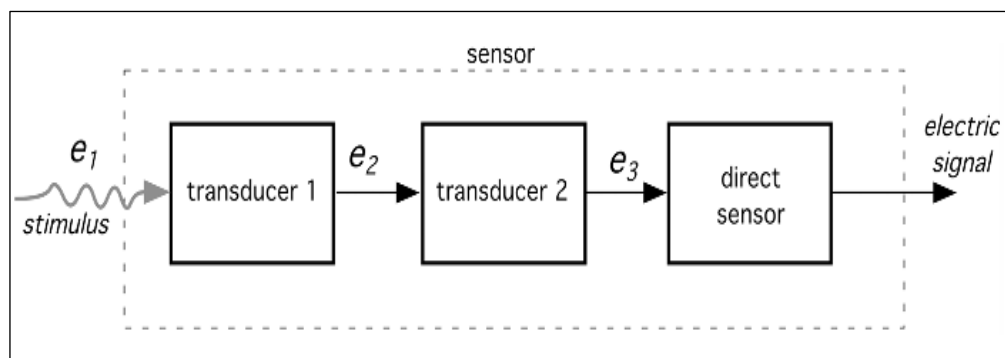
**2.10.3 Definición del actuador.** Un actuador puede ser descrito como opuesto a un sensor, que convierte señal eléctrica en energía no eléctrica. Por ejemplo, un motor eléctrico es un actuador que convierte la energía eléctrica en la acción mecánica.

Existen dos tipos de sensores: directos y complejo.

Un sensor directo convierte un estímulo en una señal eléctrica o modifica una señal eléctrica mediante el uso de un efecto físico apropiado.

El sensor complejo, necesita uno o más transductores de energía antes de conectar a un sensor directo, se puede emplear para generar una salida eléctrica.

Figura 26. Sensor complejo, incorpora varios transductores,  $e_1$ ,  $e_2$ .



Fuente: (Fraden, 2004) - pág. 3

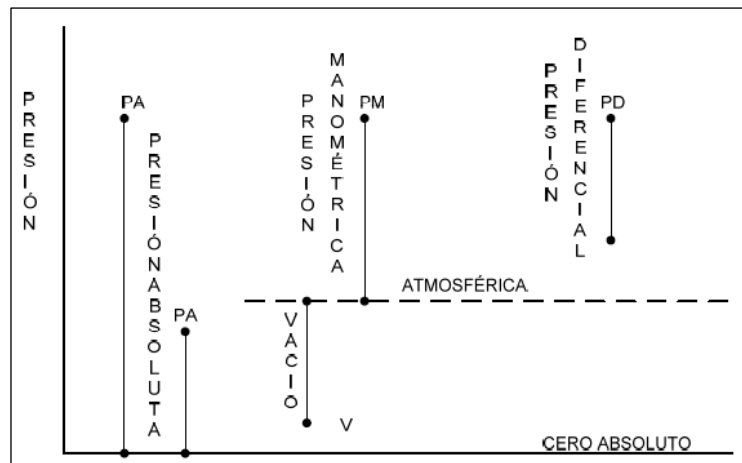
**2.10.4 Medición de presión.** Presión se define como una fuerza (F) que actúa en una superficie (S).

$$\text{Presión } p = \frac{\text{Fuerza } F}{\text{Superficie } S} \quad (27)$$

Puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmosferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada).

**2.10.4.1 Tipos de presión.** La medición de presión compara la presión actual con una presión de referencia. La tecnología de medición de presión distingue entre los siguientes tipos de presión, permitiendo establecer la relación entre la presión medida y la presión de referencia.

Figura 27. Diferentes tipos de presión.



Fuente: <http://materias.fi.uba.ar/7609/material/S0304MedicionPresion1.pdf>

- *Presión absoluta.* Presión medida por encima del cero absoluto con referencia del vacío ideal. La presión de medición siempre es mayor que la presión de referencia. Este término se creó debido a que la presión atmosférica varía con la altitud y muchas veces los diseños se hacen en otros países a diferentes altitudes sobre el nivel del mar por lo que un término absoluto unifica criterios.
- Presión atmosférica. Es la presión ejercida por la atmósfera de la tierra, se mide normalmente por medio del barómetro (presión barométrica). A nivel del mar o en alturas próximas a éste, el valor de la presión es cercano a 14.7 lb/plg<sup>2</sup> (760 mmHg), disminuyendo este valor con la altitud.
- Presión manométrica. Es la presión superior a la atmosférica, que se mide por medio de un elemento que define la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica que existe. El valor absoluto de la presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.
- Presión de vacío. Es la presión menor que la presión atmosférica. Su valor está comprendido entre el cero absoluto y el valor de la presión atmosférica. La presión de vacío se mide con el vacuómetro.
- La presión absoluta es igual a la presión manométrica más la presión atmosférica, la relación de los diferentes tipos de presión se expresa en la figura 27.

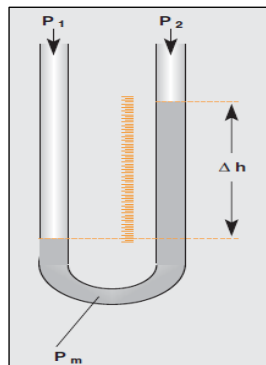
#### 2.10.4.2 Instrumentos para medición de la presión.

##### a) Instrumentos mecánicos.

**Elementos primarios de medición directa.** Miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocida como son:

- **Manómetro de tubo en U.** Consiste en un tubo de forma de "U", que deposita una cantidad de líquido de densidad conocida. En cada una de las ramas del tubo se aplica una presión. El resultado de la comparación de la presión y una presión de referencia, si se desprecian efectos secundarios, es una diferencia de nivel de líquido  $h$ , en este caso  $\Delta h$ . (PALLÁS, 2003 pág. 32)

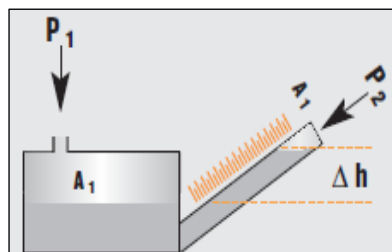
Figura 28. Manómetro de tubo en U.



Fuente: [http://www.testo.com/online/embedded/Sites/ARG/SharedDocuments/Downloads/Guia\\_presion.pdf](http://www.testo.com/online/embedded/Sites/ARG/SharedDocuments/Downloads/Guia_presion.pdf)

- **Manómetro de tubo inclinado.** Es un manómetro cuyo brazo vertical está colocado en una posición casi horizontal, de manera que en un cambio de presión produce un cambio en el nivel de medición del dentro del tubo.

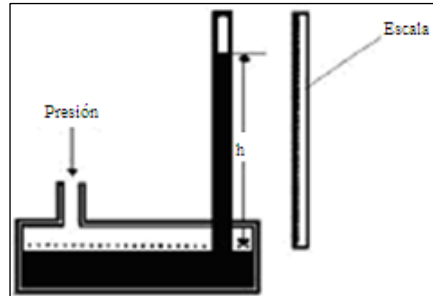
Figura 29. Manómetro de tubo inclinado.



Fuente: [http://www.testo.com/online/embedded/Sites/ARG/SharedDocuments/Downloads/Guia\\_presion.pdf](http://www.testo.com/online/embedded/Sites/ARG/SharedDocuments/Downloads/Guia_presion.pdf)

- Manómetro de pozo. Es similar al tipo "U", sin embargo un brazo de la "U" se sustituye por una cubeta o pozo de gran diámetro, de forma que la presión diferencial es indicada únicamente por la altura del líquido brazo no eliminada.

Figura 30. Manómetro de pozo.

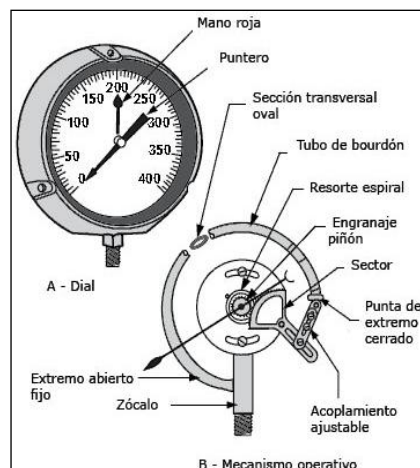


Fuente: <http://planespecifico.blogspot.com/2011/07/instrumentos-para-medicion-de-presion.html>

**Elementos primarios elásticos.** Los elementos primarios elásticos se deforman con la presión interna del fluido que contienen como son:

- Tubo Bourdon. Es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, este tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por un sector dentado y un piñón.

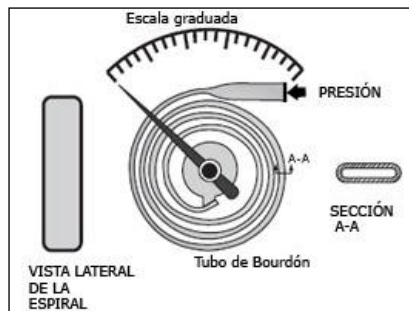
Figura 31. Tubo Bourdon.



Fuente: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica34.htm>

- Tipo espiral. Se forma arrollando el tubo Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común, proporciona un desplazamiento grande del extremo libre, por lo que son ideales para los registradores.

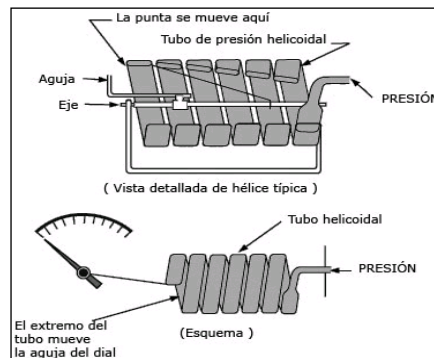
Figura 32. Elemento en espiral.



Fuente: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica34.htm>

- Tipo helicoidal. Se forma arrollando más de una espira en forma de espira.

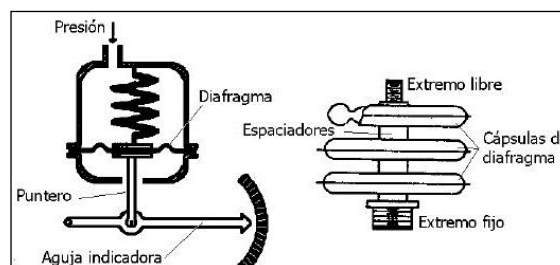
Figura 33. Tipo helicoidal.



Fuente: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica34.htm>

- *Diafragma*. Consiste en una o varias cápsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, al aplicar la presión, cada capsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por palancas en un indicador.

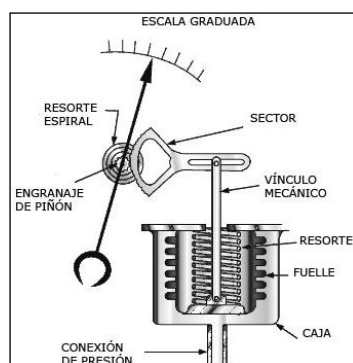
Figura 34. Tipo diafragma.



Fuente: <http://www.tecnoficio.com/docs/doc57.php>

- *De fuelle*. Es similar al diafragma, pero con una sola pieza flexible. Se emplean para pequeñas presiones.

Figura 35. Indicador de fuelle.



Fuente: <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica34.htm>

En la *Tabla 4*, se observa las principales características de los elementos mecánicos de medición de presión.

Tabla 4. Elementos mecánicos.

| Instrumento    |                   | Campo de medida    | Precisión en % de toda la escala | Temperatura máxima de servicio | Presión estática máxima |
|----------------|-------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Medida directa | Barómetro cubeta  | 0,1 - 3 m cda      | 0,5 - 1%                         | Ambiente                       | 6 bar                   |
|                | Tubo en U         | 0,2 - 1,2 m cda    | 0,5 - 1%                         | Ambiente                       | 10 bar                  |
|                | Tubo inclinado    | 0,01 - 1,2 m cda   | 0,5 - 1%                         | Ambiente                       | 10 bar                  |
|                | Toro pendular     | 0,5 - 10 m cda     | 0,5 - 1%                         | Ambiente                       | 100 - 600 bar           |
|                | Manómetro campana | 0,005 - 1 m cda    | 0,5 - 1%                         | Ambiente                       | Atmosférica             |
| Elásticos      | Tubo Bourdon      | 0,5 - 6000 bar     | 0,5 - 1%                         | 90° C                          | 6000 bar                |
|                | Espiral           | 0,5 - 2500 bar     | 0,5 - 1%                         | 90° C                          | 2500 bar                |
|                | Helicoidal        | 0,5 - 5000 bar     | 0,5 - 1%                         | 90° C                          | 5000 bar                |
|                | Diafragma         | 50 mm cda - 2 bar  | 0,5 - 1%                         | 90° C                          | 2 bar                   |
|                | Fuelle            | 100 mm cda - 2 bar | 0,5 - 1%                         | 90° C                          | 2 bar                   |

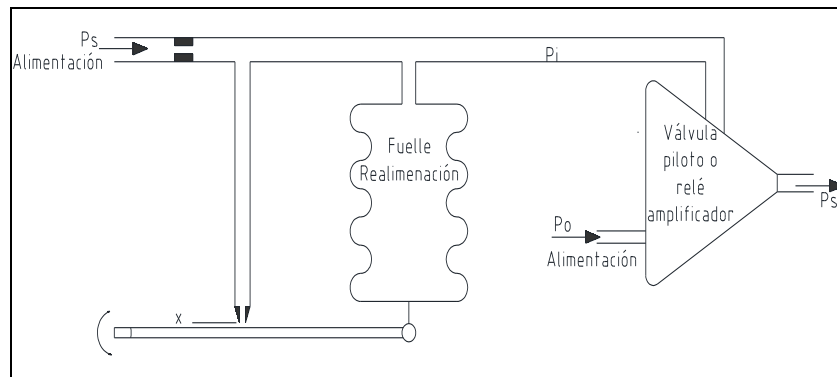
Fuente: [http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion\\_y\\_Control/Ivan\\_Velazquez/Catdra/Capitulo%202.1%20Presion.pdf](http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion_y_Control/Ivan_Velazquez/Catdra/Capitulo%202.1%20Presion.pdf)

## b) Instrumentos neumáticos.

Los elementos neumáticos se consideran como los instrumentos transmisores neumáticos cuya variable de medida es la presión adecuada al campo de medida correspondiente. Como pueden ser:

**Transmisor de equilibrio de movimiento.** Estos instrumentos compara el movimiento del elemento de medición asociado al obturador con un fuelle de realimentación de la presión posterior de la tobera, en la cual todo el conjunto se estabiliza según la diferencia de movimientos alcanzados en una posición de equilibrio para que exista una correspondencia lineal entre la variable y la señal de salida.

Figura 36. Transmisor de equilibrio de movimiento tipo fuelle.



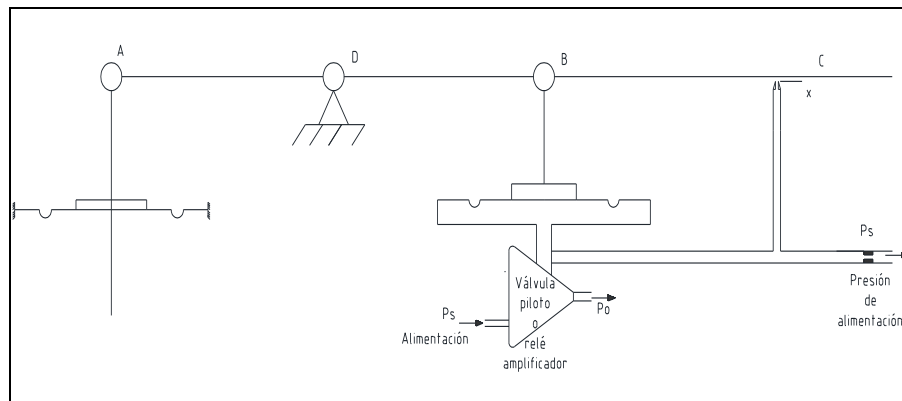
Fuente: Autores.

Existen distintas configuraciones de transmisores de equilibrio de movimiento para la medición de distintos tipos de presión como son:

- Sensor de fuelle con balance de presión.
- Sensor de fuelles opuestos.
- Sensor de fuelles con resorte calibrado.
- Sensor de presión de Bourdon espiral.
- Sensor de presión tipo diafragma.

**Transmisor de equilibrio de fuerzas.** En este instrumento, el elemento de medición ejerce una fuerza en A sobre una palanca AC que tiene un apoyo en un punto D. cuando aumenta la fuerza por el elemento de medición la palanca se desequilibra, tapa la tobera la presión aumenta y el diafragma ejerce una fuerza hacia arriba alcanzado un nuevo equilibrio.

Figura 37. Transmisor de equilibrio de fuerzas.



Fuente: Autores.

Existen distintas configuraciones de transmisores de equilibrio de fuerzas como:

- Sensor de presión absoluto tipo fuelle.
- Sensor de presión tipo fuelle para presiones manométricas.
- Sensor de presión de Bourdon tipo C.
- Sensor de presión tipo diafragma.

**Transmisor de equilibrio de momentos.** El desequilibrio de fuerzas producido por el caudal, crea un par al que se opone el generado por el fuelle de realimentación a través de una rueda de apoyo móvil situado en el brazo del transmisor.

**c) Instrumentos electromecánicos.**

Estos elementos de presión están compuestos por un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica. El elemento mecánico puede ser un tubo de Bourdon, espiral, hélice, diafragma o combinación de los mismos a través de la palanca que convierte la presión en un desplazamiento mecánico de fuerza, se clasifica en:

- Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas.
- Resistivos.
- Magnéticos.
- Capacitivos.
- Extensiométricas.
- Piezoeléctricos.

**d) Instrumentos electrónicos de vacío.**

Los instrumentos electrónicos de vacío, se fundamenta en las variaciones de determinadas propiedades físicas de los gases producidas por los cambios de presión. Se emplean para la medida de alto vacío y son muy sensibles. Se clasifica en:

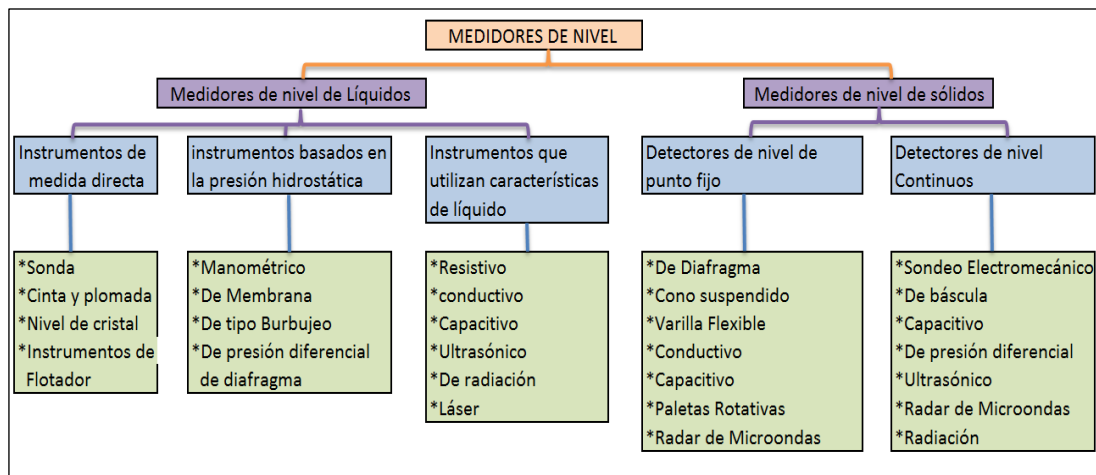
- Presión hidrostática.
- Conductividad térmica.
- Transductores de ionización.



**2.10.5 Medición de nivel.** El nivel es una de las variables de proceso más utilizadas para el control de las plantas industriales. En las medidas de nivel para el control de procesos no se requiere una gran precisión, salvo en los casos de dosificación por llenado de depósito, mientras que en el caso de medida de almacenamiento o de transmisión de picos de nivel instantáneos la precisión es fundamental.

**2.10.5.1 Instrumentos para medición de nivel.** En la actualidad se dispone de una amplia gama de técnicas de medición por lo cual no siempre resulta fácil la elección del método de obtención de lecturas que se adapte mejor a los requerimientos específicos de una instalación. Los métodos de medición se clasifican en:

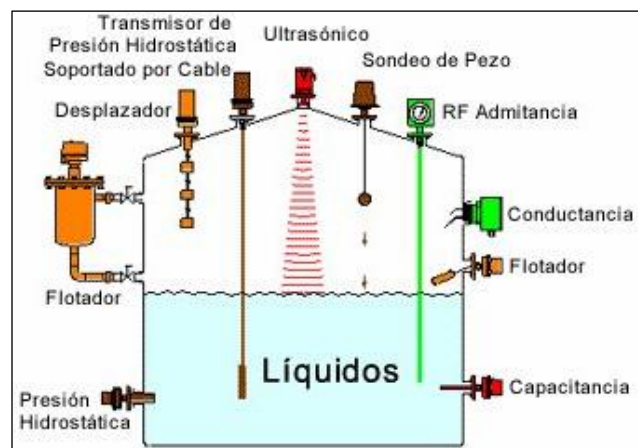
Figura 38. Clasificación de los instrumentos para medición de nivel.



Fuente: Autores.

#### 2.10.5.2 Medidores de nivel de líquidos.

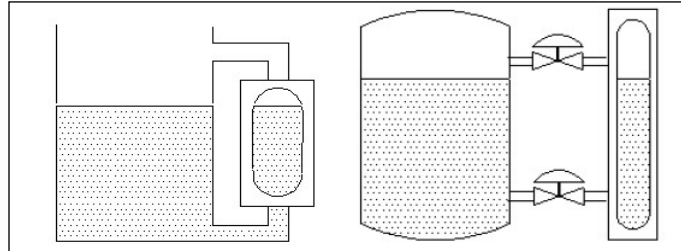
Figura 39. Clasificación de los instrumentos para medición de nivel de fluidos.



Fuente: <http://www.antechsv.com/2010/11/medidores-de-nivel-de-solidos-y.html>

*Instrumentos de medida directa.* Estos instrumentos permiten la medida de la altura del fluido de manera directa desde un punto de referencia.

Figura 40. (a) Estanque abierto, (b) estanque cerrado.



Fuente: [http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion\\_y\\_Control/Ivan\\_Velazquez/Catedra/Capitulo%202.3%20Nivel.pdf](http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion_y_Control/Ivan_Velazquez/Catedra/Capitulo%202.3%20Nivel.pdf)

*Instrumentos basados en la presión hidrostática.* Todos estos equipos están regidos por el mismo principio de funcionamiento: presión hidrostática, y utilizan la siguiente ecuación:

$$h = \frac{P + P_0}{g \cdot \rho} \quad (28)$$

Dónde:

P: Presión en la parte inferior del tanque.

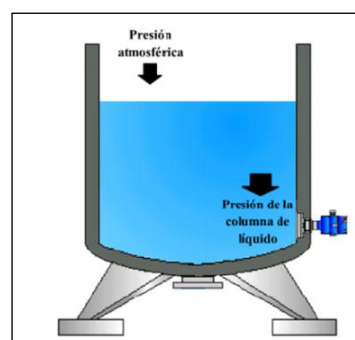
$P_0$ : Presión atmosférica.

$\rho$ : Densidad.

g: Aceleración de la gravedad.

h: Altura o nivel del fluido.

Figura 41. Instrumentos basados en la presión hidrostática.

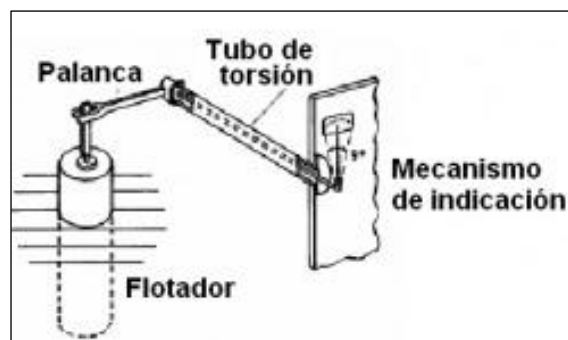


Fuente: [http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion\\_y\\_Control/Ivan\\_Velazquez/Catedra/Capitulo%202.3%20Nivel.pdf](http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion_y_Control/Ivan_Velazquez/Catedra/Capitulo%202.3%20Nivel.pdf)

Si el tanque se encuentra cerrado, entonces  $P_o = 0$ , pues sobre el no actúa la presión atmosférica.

*Instrumentos basados en el desplazamiento.* El medidor de nivel por desplazamiento está basado en el principio de Arquímedes. Consiste en un flotador parcialmente sumergido en el líquido y conectado mediante un brazo a un tubo de torsión, unido al tanque. Dentro del tubo y unido a su extremo libre hay una varilla que transmite el movimiento de giro a un transmisor exterior al tanque. El ángulo de rotación del extremo libre del tubo de torsión es función directa de la fuerza aplicada. Al subir el nivel, el líquido ejerce un empuje sobre el flotador igual al volumen de la parte sumergida multiplicada por la densidad del líquido, tendiendo a neutralizar su peso propio, así que el esfuerzo medido por el tubo de torsión será muy pequeño.

Figura 42. Instrumentos basados en el desplazamiento.



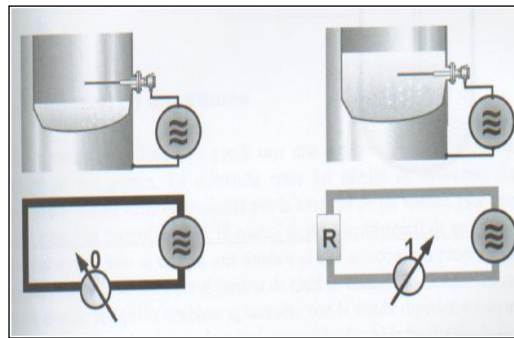
Fuente: [http://www.uhu.es/prochem/wiki/index.php/G-\\_Equipos](http://www.uhu.es/prochem/wiki/index.php/G-_Equipos)

El instrumento puede usarse en tanques abiertos y cerrados, a presión o a vacío, con una buena sensibilidad, pero presenta el inconveniente del riesgo de depósitos de sólidos en el flotador que afectan a la precisión de la medida.

*Instrumentos que utilizan características eléctricas del líquido.* Este método solo es adecuado para detección de nivel en líquidos conductivos, y consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor, como para excitar el circuito electrónico.

La impedancia mínima es del orden de los 20 mΩ/cm y la tensión de alimentación es alterna, para evitar fenómenos de oxidación en las sondas, por causa del efecto de la electrolisis. Cuando el líquido moja los electrodos, se cierra el circuito electrónico y circula una corriente segura, del orden de los 2 mA.

Figura 43. Instrumentos basados en conductividad eléctrica.

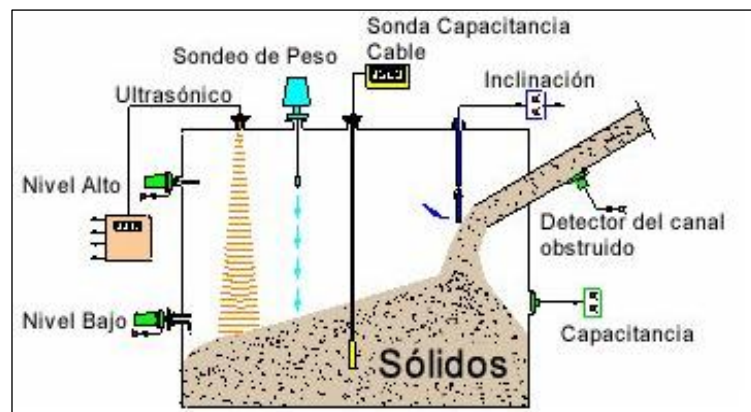


Fuente: [http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion\\_y\\_Control/Ivan\\_Velazquez/Catdra/Capitulo%202.3%20Nivel.pdf](http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion_y_Control/Ivan_Velazquez/Catdra/Capitulo%202.3%20Nivel.pdf)

El instrumento se emplea como alarma o como control de nivel alto y bajo, utiliza relés eléctricos para líquidos para buena conductividad y relés eléctricos para líquidos con baja conductividad.

**2.10.5.3 Medidores de nivel de sólidos.** En los procesos continuos la industria ha ido exigiendo el desarrollo de instrumentos capaces de medir el nivel de sólidos en puntos fijos o de forma continua, en particular en los tanques o silos, destinados a contener materias primas o productos finales.

Figura 44. Clasificación de los instrumentos para medición de nivel de sólidos.



Fuente: <http://www.antechsv.com/2010/11/medidores-de-nivel-de-solidos-y.html>

*Detectores de nivel de punto fijo.* Los detectores de nivel de punto fijo proporcionan una medida en uno o en varios puntos fijos determinados, esto es que la señal es intermitente más no continua. Los sistemas más empleados son: el diafragma, el cono suspendido, la varilla flexible, el medidor conductivo, las paletas rotativas y los ultrasonidos.

*Detectores de nivel continuos.* Proporcionan una medida continua del nivel, desde el punto más bajo al más alto, entre los elementos empleados se encuentran:

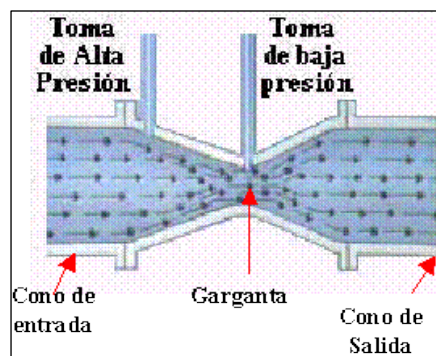
- Peso móvil
- De báscula
- Capacitivo
- Presión diferencial
- De ultrasonidos
- De radiación

**2.10.6 Medición de flujo y caudal.** Se denomina flujo al movimiento de fluidos por canales o conductos abiertos o cerrados. El caudal es la cantidad de material, en peso o volumen que fluye por unidad de tiempo.

**2.10.6.1 Instrumentos para medición de flujo.**

*Tubo Venturi.* Origina una pérdida de presión al pasar por él un fluido. Consta de una tubería corta recta, o garganta, entre dos tramos cónicos. La presión varía en la proximidad de la sección estrecha. Así, al colocar un manómetro en la garganta se mide la caída de presión y hace posible calcular el caudal instantáneo.

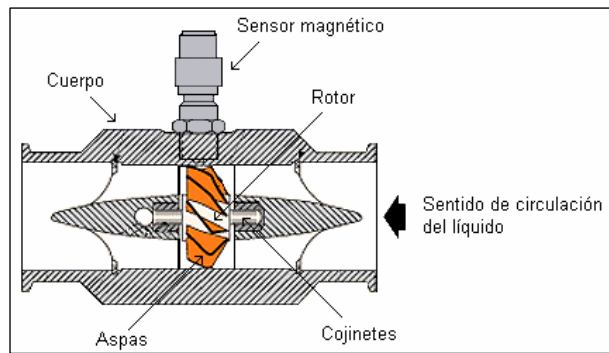
Figura 45. Medidor de tubo Venturi.



Fuente: <http://www.Caudal/web-final/Medidores%20Diferenciales.htm>

*Medidor de turbina.* Presenta un dispositivo conformado por bobinas que generan un campo electromagnético en un sector del dispositivo, en el interior se tiene una turbina, la cual al ser atravesada por el fluido la hace girar y a su vez corta el campo magnético generado por el dispositivo, esta interrupción es interpretada por un circuito y de esta manera se efectúa la medición del caudal.

Figura 46. Medidor de turbina.



Fuente: [http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Medicion\\_de\\_Caudal.pdf](http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Medicion_de_Caudal.pdf)

*Medidor magnético.* Emplea el principio del electromagnetismo, esto es cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético se genera una fuerza electromotriz en el conductor, siendo su magnitud directamente proporcional a la velocidad media del conductor en movimiento.

**2.10.7 Medición de proximidad.** Se denominan así a cualquier dispositivo eléctrico, electromecánico o electrónico que reaccione de forma que detecta la presencia de materiales situado en un entorno definido del mismo.

**2.10.7.1 Instrumentos para medición de proximidad.**

*Sensores resistivos.* El elemento resistivo o pista está realizado mediante un cable de alta resistencia empaquetado en un aislante. El contacto consiste de un muelle, un brazo conductor que puede moverse a lo largo de la pista del potenciómetro. Se crea una resistencia variable entre el final de la pista y el contacto móvil.

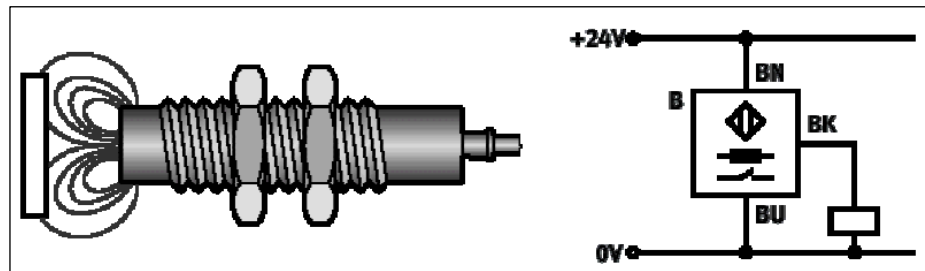
Figura 47. Sensor resistivo.



Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/rechner/sensores-movimiento-magneto-resistivos-9277-180996.html>

*Sensores inductivos.* Son sensores que advierten la presencia de un material metálico o materiales conductores de electricidad. Los componentes más importantes son un oscilador, un rectificador demodulador, un amplificador biestable y una etapa de salida. El campo magnético que es dirigido hacia el exterior, es generado por medio del núcleo de ferrita semiabierto de una bobina osciladora y de un apantallado adicional.

Figura 48. Sensor inductivo.

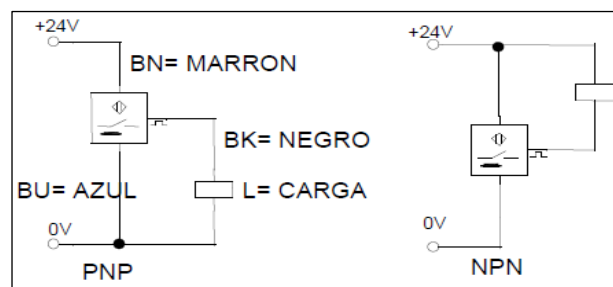


Fuente: <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r71916.PDF>

Esto crea un área limitada a lo largo de la superficie activa del sensor de proximidad inductivo, la cual se conoce como zona activa de conmutación. Dependiendo del tipo de conmutación, la etapa final es conectada o interrumpida si se presenta un objeto metálico en la zona activa de conmutación.

La designación de las conexiones de los sensores de proximidad inductivos están estandarizadas. El símbolo se puede ver en la figura 53 con las conexiones correspondientes según sea del tipo PNP o NPN.

Figura 49. Símbolo de un sensor inductivo, conexiones PNP y NPN.

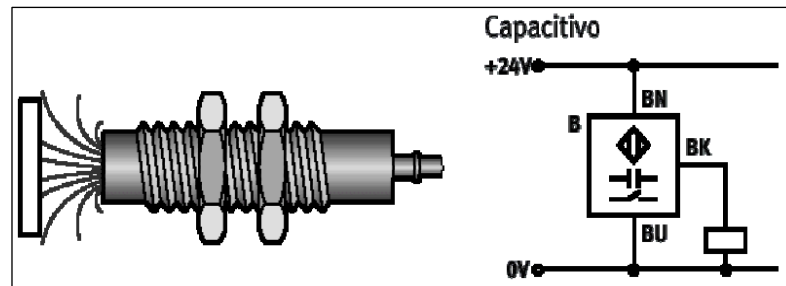


Fuente: <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r71916.PDF>

*Sensores capacitivos.* Estos sensores detectan la presencia de cualquier material. El principio de funcionamiento, está basado en la medición de los cambios de capacitancia eléctrica de un condensador en un circuito resonante RC, ante la aproximación de cualquier material. Además se compone igual que en el caso del

inductivo de un rectificador demodulador, un amplificador biestable y una etapa de salida. Se crea un campo electrostático disperso, entre un electrodo "activo" y uno puesto a tierra. Generalmente también se halla presente un tercer electrodo para compensación de las influencias que pueda ocasionar la humedad en el sensor de proximidad. Si un objeto o un medio (metal, plástico, vidrio, madera, agua), irrumpe en la zona activa de conmutación, la capacitancia del circuito resonante se altera.

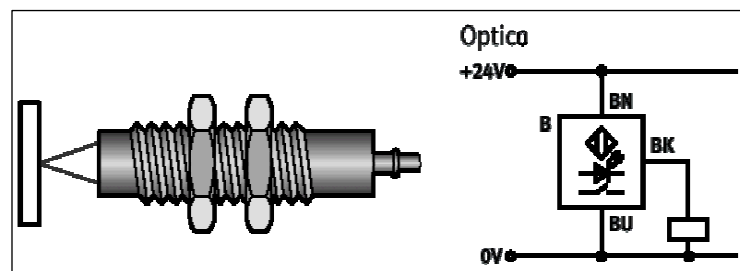
Figura 50. Sensor capacitivo.



Fuente: <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r71916.PDF>

*Sensores ópticos.* Basados en el Efecto Hall, utilizan medios ópticos y electrónicos para detectar objetos. Para ello utilizan luz roja (visible) o infrarroja (invisible). Como fuente de luz se utilizan diodos o transistores emisores de luz. Los detectores de luz roja se ajustan mejor que los de luz infrarroja. Los sensores de proximidad ópticos consisten básicamente en dos partes, el emisor y el receptor. El emisor y el receptor pueden hallarse instalados en un cuerpo común, o en cuerpos separados.

Figura 51. Sensor óptico.

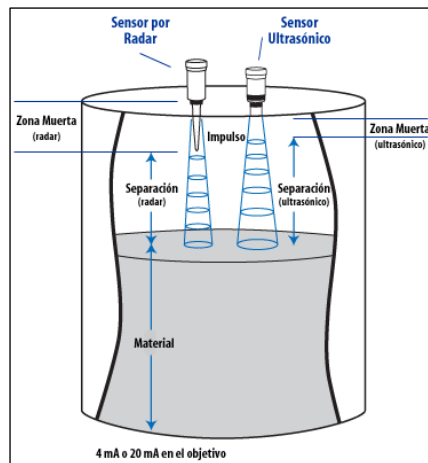


Fuente: <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r71916.PDF>

*Sensores ultrasónicos.* Miden el tiempo transcurrido entre la emisión de una onda ultrasónica y la recepción de su eco. Este transductor genera y envía una onda, en el momento en que la onda encuentra un objeto, esta rebota y se da una onda reflejada, que vuelve hacia el transductor. Internamente un micro controlador analiza la señal recibida y mide el intervalo de tiempo entre la señal enviada y la recibida.



Figura 52. Sensor ultrasónico.



Fuente: <http://dev.madisonco.com/madison/espanol/reference/noncontact/operation.htm>

## 2.11 Descripción del sistema de adquisición de datos

**2.11.1 Introducción.** La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Para crear un sistema de adquisición de datos de sensores y sistemas de control debe reunir los requisitos de ingeniería.

**2.11.2 Partes de un sistema DAQ.** Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs en la industria, proporcionan una solución más potente, flexible y rentable.

Un sistema DAQ, *figura 2.56* consiste en:

- Sensores.
- Hardware de medidas DAQ.
- PC con software programable.

Figura 53. Partes de un sistema DAQ.



Fuente: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

**2.11.2.1 Descripción del sensor.** Como ya se intensificó la definición del sensor en el capítulo anterior como un convertidor de un fenómeno físico en una señal eléctrica que se pueda medir. Ahora, en algunos sensores pueden requerir componentes adicionales y circuitos para producir correctamente una señal que puede ser leída con precisión y con toda seguridad por un dispositivo DAQ.

**2.11.2.2 Descripción del dispositivo DAQ.** El hardware DAQ actúa como la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas.

Los tres componentes clave de un dispositivo DAQ usado para medir una señal son:

- *Circuito de acondicionamiento de señales.* Las señales de los sensores o del mundo exterior pueden ser ruidosas o demasiado peligrosas para medirse directamente. El circuito de acondicionamiento de señales manipula una señal de tal forma que es apropiado para entrada a un ADC. Este circuito puede incluir amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento. Algunos dispositivos DAQ incluyen acondicionamiento de señales integrado diseñado para medir tipos específicos de sensores.
- *Convertidor analógico-digital (ADC).* Las señales analógicas de los sensores deben ser convertidas en digitales antes de ser manipuladas por el equipo digital como una PC. Un ADC es un chip que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. En la práctica, las señales analógicas varían continuamente con el tiempo y un ADC realiza "muestras" periódicas de la señal a una razón predefinida. Estas muestras son transferidas a una PC a través de un bus, donde la señal original es reconstruida desde las muestras en software.
- *Bus de PC.* Los dispositivos DAQ se conectan a una PC a través de una ranura o puerto. El bus de la PC sirve como la interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC para pasar instrucciones y datos medidos. Los dispositivos DAQ se ofrecen en los buses de PC más comunes, incluyendo USB, PCI, PCI Express y Ethernet. Recientemente, los dispositivos DAQ han llegado a estar disponibles para 802.11 Wi-Fi para comunicación inalámbrica.

**2.11.2.3 Descripción de la función de la PC en un sistema DAQ.** Una PC con software programable controla la operación del dispositivo DAQ y es usada para procesar, visualizar y almacenar datos de medida. Diferentes tipos de PCs son usadas en diferentes tipos de aplicaciones. Una PC de escritorio se puede utilizar en un laboratorio por su poder de procesamiento, una laptop se puede utilizar por su portabilidad o una PC industrial se puede utilizar en una planta de producción por su robustez. Los diferentes componentes de Software en un Sistema DAQ son:

- *Software controlador.* El software controlador ofrece al software de aplicación la habilidad de interactuar con un dispositivo DAQ. Simplifica la comunicación con el dispositivo DAQ al abstraer comandos de hardware de bajo nivel y programación a nivel de registro. Generalmente, el software controlador DAQ expone una interfaz de programación de aplicaciones (API) que es usada en un entorno de programación para construir software de aplicación.
- *Software de aplicación.* El software de aplicación facilita la interacción entre la PC y el usuario para adquirir, analizar y presentar datos de medidas. Puede ser una aplicación pre-construida con funcionalidad predefinida o un entorno de programación para construir aplicaciones con funcionalidad personalizada. Las aplicaciones personalizadas generalmente son usadas para automatizar múltiples funciones de un dispositivo DAQ, realizar algoritmos de procesamiento de señales y mostrar interfaces de usuario personalizadas.

## **2.12 Descripción del software LabVIEW**

**2.12.1 Introducción.** LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), es un lenguaje de programación gráfica que utiliza iconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones de adquisición de datos, control de instrumentos y automatización industrial.

National Instruments es la empresa desarrolladora y propietaria de LabVIEW, comenzó en 1976 en Austin, Texas. Lanzó al mercado por primera vez en 1986 con el lanzamiento de LabVIEW 1.0 para Macintosh (ordenadores con interfaz gráfica en aquella época). El software LabVIEW, construye una interfaz de usuario con un conjunto de herramientas y objetos. Es ideal para cualquier sistema de medidas y control para la construcción de una amplia variedad de aplicaciones en menos tiempo

y de manera más eficiente, como también ayuda a escalar desde el diseño hasta pruebas.

#### **2.12.2** *Principales áreas de aplicaciones:*

- Adquisición de datos y análisis matemático.
- Automatización industrial y programación de PAC.
- Diseño de controladores: simulación y testeo rápido.
- Control y supervisión de procesos.
- Visión artificial y control de movimiento.
- Adquirir datos y procesar señales.
- Automatizar sistemas de pruebas y validación.
- Control de instrumentos.
- Sistemas embebidos de monitoreo y control.

Un programa desarrollado en LabVIEW se compone de un panel frontal y un diagrama de bloques. El panel frontal es la interfaz interactiva de usuario de un VI debido a que simula el panel de un instrumento físico.

El panel frontal puede contener botones, interruptores, pulsadores, gráficas y otros controles e indicadores que permiten al usuario monitorear, registrar y controlar parámetros de los procesos de interés.

El diagrama de bloques es el programa propiamente dicho, es aquí donde se define su funcionalidad, contiene el código fuente del VI, es aquí donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier proceso de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal. Adicionalmente, el diagrama de bloque contiene funciones y estructuras incorporadas en las bibliotecas de LabVIEW.

**2.12.3** *Diseño de instrumentación virtual.* El concepto de instrumentación virtual nace a partir del uso del computador como instrumento de medición de señales como presión, caudal, velocidad, fuerza, etc.

Sin embargo, la instrumentación virtual va más allá de la simple medición de corriente o voltaje sino que involucra el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de datos e información relacionada con la medición de una o varias señales específicas.

**2.12.4 Descripción de un VI.** Los VIs, virtual instruments, están integrados por 3 partes principales: el panel frontal, el diagrama de bloques, y el icono/conector. El panel frontal está compuesto por una combinación de controladores e indicadores que le permiten al usuario enviar y recibir datos del VI.

El diagrama de bloques está compuesto de nodos, terminales y cables. Los nodos son elementos de ejecución del programa. Los nodos son análogos a estatutos, funciones y subrutinas en los lenguajes de programación basados en texto. Los terminales son puertos a través de los cuales los datos pasan entre los nodos del diagrama de bloques. Los cables son rutas de datos entre terminales. Son análogos a las variables en los lenguajes de programación convencionales.

## **CAPÍTULO III**

### **3. PUESTA A PUNTO DEL BANCO DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO**

#### **3.1 Descripción del banco de prueba de la chimenea de equilibrio**

El banco de la chimenea de equilibrio, serie ATE 1247 del laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica de la Facultad de Mecánica, tiene la función de realizar un estudio de las variaciones de presión similar al que ocurre en sistemas con grandes ductos como las centrales hidroeléctricas, que producen fluctuaciones de presión debido a cambios de caudal como sucede al encender y apagar las máquinas hidráulicas o al abrir y cerrar elementos de bloqueo.

Se diferencia entre cambios de presión rápidos, que se propagan a velocidad de sonido (golpes de ariete), y cambios de presión lentos debido a oscilaciones másicas. Con el banco de ensayos se generan y visualizan golpes de ariete producidas en tuberías y se demuestra el funcionamiento de la chimenea de equilibrio.

El banco de pruebas está provisto de dos tramos de tubo de acero inoxidable de 1", el primer tramo está compuesto por una válvula de accionamiento rápido y una válvula de control.

El segundo tramo de tubo tiene instalado la chimenea de equilibrio, un grifo de apertura rápida de  $\frac{3}{4}$ " y una válvula de control.

#### **3.2 Mantenimiento del sistema de alimentación**

**3.2.1 Bomba centrífuga.** Es indispensable que la fuente de alimentación hidráulica del banco de pruebas, que es la bomba este en buenas condiciones de funcionamiento para garantizar resultados efectivos durante el estudio de las variaciones de presión en la tubería, para lo cual se realizó el desmontaje de la bomba para inspeccionar y sustituir los elementos en malas condiciones como las escobillas, cables, enchufe entre otros. Finalmente para el montaje se procedió a la limpieza total de elementos mecánicos y eléctricos que conforman la bomba centrífuga.

Figura 54. Bomba centrífuga.



Fuente: Autores.

**3.2.2** *Reservorio.* El mantenimiento del reservorio consistió en inspeccionar y reparar las fallas existentes en el recubrimiento del mismo, así como la remoción de sedimentos acumulados en la parte interna.

Figura 55. Reservorio.



Fuente: Autores.

**3.2.3** *Depósito.* En el depósito se efectuó la adecuación e instalación correcta para nivelar con los elementos de la chimenea de Equilibrio, además se realizó la limpieza para mantener en buen estado y condiciones funcionales.

Figura 56. Depósito.



Fuente: Autores.

**3.2.4 Tubería.** Para realizar el mantenimiento de las tuberías de acero inoxidable como también de las tuberías PVC, se procedió al desmontaje de las instalaciones del banco de pruebas para luego remover sedimentos producidos por la dureza del fluido. Para evitar fugas en las uniones fue importante aplicar teflón en las uniones roscadas y sellador IPS Plus en las bridas.

Figura 57.Tubería.



Fuente: Autores.

### 3.3 Mantenimiento de las válvulas de paso

Se realizó la inspección visual y pruebas de ajuste para verificar las condiciones del paso del fluido así como su respectiva limpieza y aprietes necesarios para sellar, y posterior montaje en la tubería.

Figura 58. Accesorios.



Fuente: Autores.

### 3.4 Mantenimiento de la chimenea de equilibrio y accesorios

La visualización de las oscilaciones del fluido producidos por las variaciones de presión debe tener las escalas claras, para ello se desmonto la chimenea de equilibrio y se ejecutó la limpieza especial en el interior de la misma.



Figura 59. Chimenea de equilibrio.

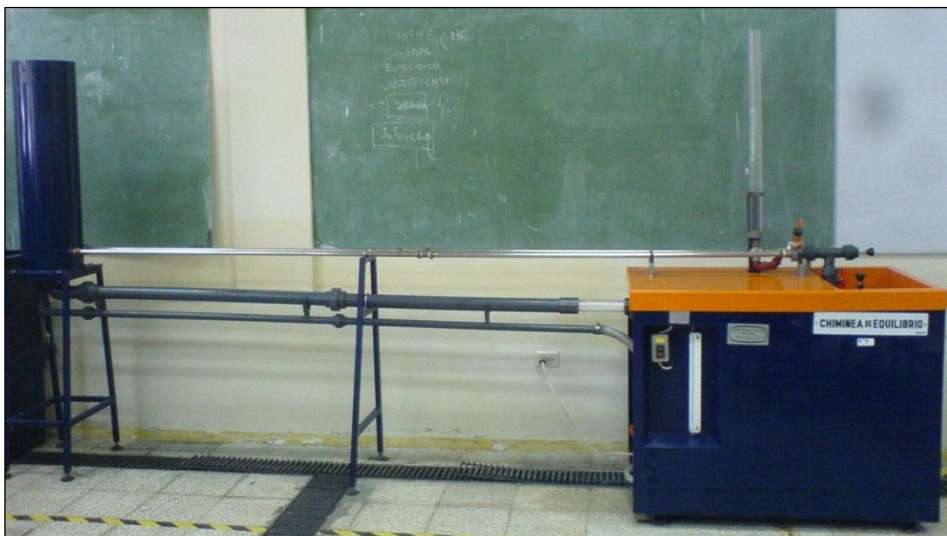


Fuente: Autores.

### 3.5 Puesta a punto de la chimenea de equilibrio

Una vez realizado el mantenimiento del banco de pruebas, se procedió a verificar la correcta instalación de la misma, antes de poner en funcionamiento el equipo completo. El nivel del agua en el reservorio debe ser lo suficiente para abastecer el depósito, en este caso llenar con 150 lt. Finalmente realizamos un funcionamiento previo para verificar posibles fugas, y así comprobar la puesta a punto de la chimenea de equilibrio.

Figura 60. Banco de pruebas chimenea de equilibrio.



Fuente: Autores.

## CAPÍTULO IV

### 4. PROYECCIÓN Y SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS E INSTRUMENTOS DEL BANCO DE PRUEBAS DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO

#### 4.1 Proyección del banco de prueba de la chimenea de equilibrio

La proyección del banco de pruebas consiste en tomar datos y realizar los cálculos para la selección de equipos e instrumentos.

Para el primer ensayo se instalaron manómetros en dos puntos para medir la variación de presión al cerrar la válvula de accionamiento rápido, tomamos los siguientes datos: Punto uno 35 psi y punto dos 20 psi aproximadamente. Con estos datos se realizó la selección de transmisores de presión de 0 – 60 psi y otro de 0 – 100 psi. Cabe indicar que sólo se tomaron estas medidas ya que para visualizar las oscilaciones es necesario colocar sensores de presión en los puntos señalados.

Para el segundo ensayo, Se tomaron los datos máximos y mínimos de las oscilaciones producidas por el golpe de ariete para obtener la gráfica correspondiente.

#### 4.2 Cálculo tipo

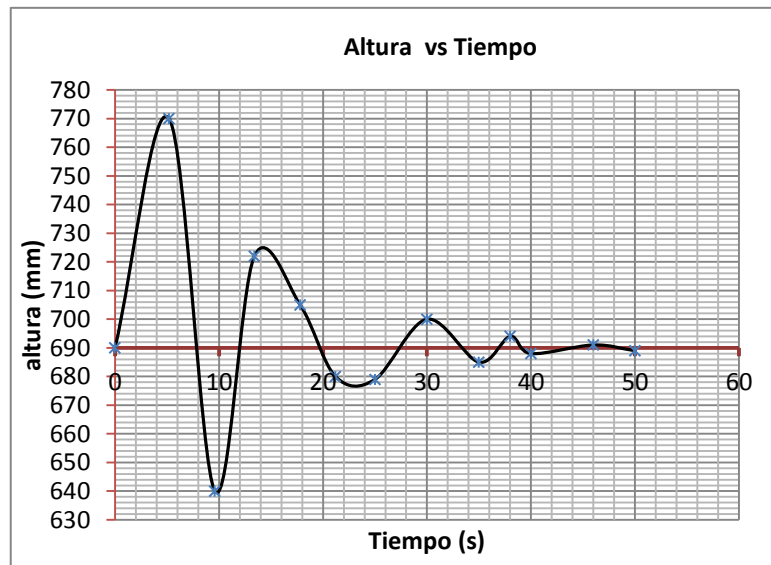
Para el segundo ensayo, se tomaron los datos máximos y mínimos de las oscilaciones para así obtener la gráfica correspondiente como se indica a continuación:

Tabla 5. Datos de altura y tiempo.

| Tiempo (s) | Altura (mm) |
|------------|-------------|
| 0          | 690         |
| 5,2        | 770         |
| 9,6        | 640         |
| 13,4       | 722         |
| 17,8       | 705         |
| 21,2       | 680         |
| 25         | 679         |
| 30         | 700         |
| 35         | 685         |
| 38         | 694         |
| 40         | 688         |

Fuente: Autores.

Gráfica 61. Oscilación del golpe de ariete en la chimenea de equilibrio.



Fuente: Autores.

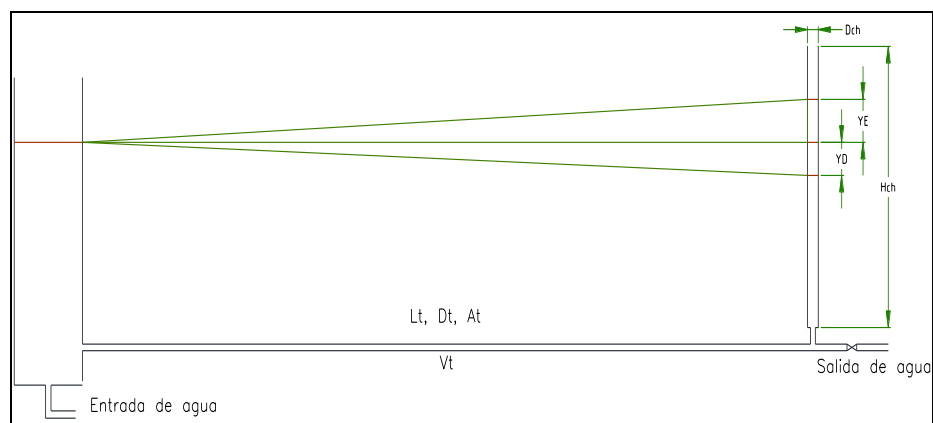
Experimentalmente se obtiene los siguientes resultados:

$$Y_E = 770\text{mm} - 690\text{mm} = 80\text{mm} = 8\text{cm} \text{ (Máx.)}$$

$$Y_D = 690\text{cm} - 640\text{cm} = 50\text{cm} = 5\text{cm} \text{ (Mín.)}$$

**4.2.1** *Estudio de las variables a ser medidas.* Una de las principales variables a tomar en cuenta para nuestro análisis es la sobrepresión máxima teórica del golpe de ariete ( $Y_{\text{máx.}}$ ), a la que llega el agua en la chimenea de equilibrio, como se muestra a continuación.

Figura 62. Estudio de las variables en la chimenea de equilibrio.



Fuente: Autores.

**Altura máxima ideal es:** 
$$Y_{m\acute{a}x.} = \frac{Q}{A_{ch}} \sqrt{\frac{A_{ch} * L}{A_c * g}} = v_{ch} \sqrt{\frac{V_{ch}}{A_c * g}}$$

Dónde:

Y máx.: Altura máxima del agua en la chimenea.

Q: Caudal que circula por la conducción.

A<sub>ch</sub>: Área transversal de la chimenea de equilibrio.

A<sub>c</sub>: Área transversal de la conducción.

L: Longitud de la chimenea de equilibrio.

V<sub>ch</sub>: Volumen de la chimenea de equilibrio.

v<sub>ch</sub>: Velocidad en la chimenea.

g: Gravedad  $\left(981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}\right)$ .

Para lo cual tomamos los siguientes datos:

Tabla 6. Datos experimentales tiempo vs volumen.

| Tiempo (s) | Volumen (lt) |
|------------|--------------|
| 10         | 5            |
| 19,5       | 10           |
| 30,9       | 15           |
| 42         | 20           |
| 54         | 25           |

Fuente: Autores.

Tiempo promedio = 10.8 s por cada 5 lt. De esta manera obtenemos el caudal:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{5000 \text{ cm}^3}{10.8 \text{ s}}$$

$$Q = 462.96 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = 4.6296 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$A_c = \frac{\pi * D_{ch}^2}{4}$$

$$A_c = \frac{\pi * (2\text{cm})^2}{4}$$

$$A_c = 3.1416 \text{ cm}^2$$

Al tener el caudal y el área de flujo, conocemos la velocidad del fluido:

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{462.96 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}}{3.1416 \text{ cm}^2}$$

$$v = 147.36 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$A_{ch} = \frac{\pi * D_{ch}^2}{4}$$

$$A_{ch} = \frac{\pi * (4.4 \text{ cm})^2}{4}$$

$$A_{ch} = 15.205 \text{ cm}^2$$

Remplazando tenemos:

$$Y_{\text{máx.}} = \frac{462.96 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}}{15.205 \text{ cm}^2} \sqrt{\frac{15.205 \text{ cm}^2 * 61 \text{ cm}}{3.1416 \text{ cm}^2 * 981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}}}$$

$$Y_{\text{máx.}} = 16.7 \text{ cm}$$

**Altura máxima real:** Si se considera las pérdidas en la tubería de presión.

$$Y_E = z_e * y_e$$

Dónde:

$y_e$  = Y máx.

$z_e$  = Factor de pérdida de carga por efecto del golpe de ariete

$$z_e = 1 - \frac{2}{3}k_e + \frac{1}{9}k_e^2$$

Cuando:

$$k_e = h_t/y_e$$

Dónde:

$h_t$ : Pérdidas de carga total en la conducción.

$$h_t = 4.098 * 10^{-3} * K * \frac{Q^{1.9}}{D^{4.9}} * l$$

Dónde:

D: Diámetro de la tubería

l: Longitud de la tubería

El valor del coeficiente K depende del material de la tubería, y se toma de la *tabla 2*.

$$h_t = 4.098 * 10^{-3} * 0.32 * \frac{\left(4.6296 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}\right)^{1.9}}{(0.02m)^{4.9}} * 0.61m$$

$$h_t = 0.07808m = 7.808cm$$

Remplazando:

$$k_e = \frac{7.808cm}{16.7cm}$$

$$k_e = 0.4675$$

$$z_e = 1 - \frac{2}{3}0.4675 + \frac{1}{9}(0.4675)^2$$

$$z_e = 0.7123$$

$$Y_E = 0.7123 * 16.7cm$$

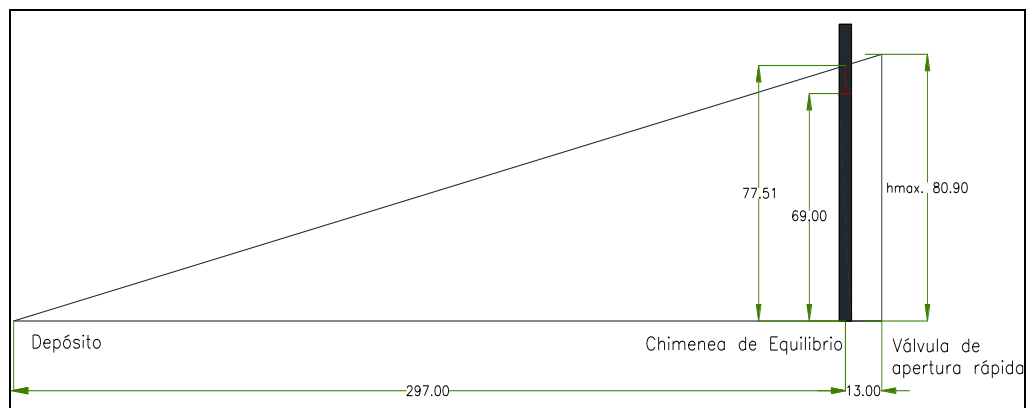
$$Y_E = 11.90cm$$

El cierre instantáneo de la válvula de apertura rápida, genera la sobrepresión que se origina en el punto donde se encuentra dicha válvula y se propaga a lo largo de la tubería como muestra la *figura 63*. Como se requiere determinar el valor de  $Y_E$  en la chimenea de equilibrio se obtiene por medio de semejanza de triángulos.

$$\frac{80.90 \text{ cm}}{310 \text{ cm}} = \frac{Y_{ch}}{297 \text{ cm}}$$

$$Y_{ch} = 77.51 \text{ cm}$$

Figura 63. Distribución de la sobrepresión.



Fuente: Autores.

Ahora,  $Y_E$  será igual a:

$$Y_E = 77.51 \text{ cm} - 69 \text{ cm}$$

$$Y_E = 8.51 \text{ cm}$$

Comparando los resultados tenemos que,  $Y_E$  (experimental) = 8cm mientras que  $Y_E$  (teórico) = 8.51cm. Se puede concluir que los resultados tienen un mínimo margen de error debido a las pérdidas por fricción producidas en la tubería y accesorios.

**Altura mínima real:**

$$Y_D = z_d * y_d$$

Dónde:

$y_d = Y \text{ máx.}$

$z_d$  = factor de pérdida de carga por efecto del golpe de ariete

$$z_d = 1 - 0.593 * k_e^3 + 1.556 * k_e^2 - 1.683 * k_e$$

Remplazando:

$$z_d = 1 - 0.593 * (0.4675)^3 + 1.556 * (0.4675)^2 - 1.683 * (0.4675)$$

$$z_d = 0.492$$

$$Y_D = 0.492 * 16.7 \text{ cm}$$

$$Y_D = \mathbf{8.22 \text{ cm}}$$

A partir de esa ecuación, se puede calcular el período de oscilaciones originadas según:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L \cdot S_{CH}}{g \cdot S_T}}$$

Remplazando tenemos:

$$T = 2 * \pi \cdot \sqrt{\frac{321 \text{ cm} * 3.1416 \text{ cm}^2}{980 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} * 15.205 \text{ cm}^2}}$$

$$T = \mathbf{1.63 \text{ s}}$$

La propagación de ondas  $c$  es:

$$c = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K D}{E \delta}}}$$

Dónde:

$c$ : es la celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería, [m/s] – SI.

$K$ : es el módulo de elasticidad del fluido (módulo de Bulk), [N/m<sup>2</sup>] – SI.



$\rho$ : es la densidad del líquido,  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  – SI.

$D$ : es el diámetro de la tubería,  $[\text{m}]$  – SI.

$E$ : es el módulo de elasticidad de la tubería,  $[\text{N}/\text{m}^2]$  – SI.

$\delta$ : es el espesor de la tubería,  $[\text{m}]$  – SI.

Remplazando tenemos:

$$a_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = 1425 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$a_0 = \sqrt{\frac{2.03 * 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}} = 1425 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c = \frac{1425 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sqrt{1 + \frac{(2.03 * 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}) * (0.02 \text{m})}{(20 * 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}) * (0.002 \text{m})}}} = 1293.69 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Además es necesario conocer la presión hidrostática producida en la tubería debido a la columna de agua, con la siguiente ecuación:

$$P = \rho * g * h \quad (29)$$

Dónde:

$\rho$  : densidad del agua

$g$ : gravedad.

$h$ : altura de la columna de agua.

Reemplazando tenemos:

$$P = (1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) * (9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) * 0,75 \text{m}$$

$$P = 7357,5 \frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}$$

$$P = 7357,5 \frac{N}{m^2}$$

$$P = 7357,5 \text{ Pa} = 1,067 \text{ psi}$$

#### 4.3 Datos técnicos de equipos e instrumentos

##### DATOS TÉCNICOS DE EQUIPOS

Bomba hidráulica:

- Tipo PV 52
- Potencia: 1Hp
- Revolución: 5000 r.p.m.
- Serie: 1667
- Marca: James Beresford & Son Ltd.
- Frecuencia: 50 Hz
- Diámetro de succión: 1¼"
- Diámetro de descarga: 1"
- Voltaje: 230/250

Tubería de alimentación al depósito:

- Diámetro: 1"
- Material: PVC
- Longitud: 3.20 m

Tubería de retorno del depósito:

- Diámetro: 2"
- Material: PVC
- Longitud: 3.70 m

Tanque reservorio:

- Volumen: 150 lt
- Material: fibra de vidrio

Tanque de depósito:

- Volumen: 37.7 lt
- Material: PVC

- Altura: 850 mm

Tubería de acero inoxidable:

- Diámetro interno: 20 mm
- Material: acero inoxidable
- Longitud: 2 tramos de 3,0 m c/u

## DATOS TÉCNICOS DE INSTRUMENTOS

Chimenea de equilibrio:

- Diámetro interno: 44 mm
- Diámetro externo: 50 mm
- Altura: 850 mm
- Material: polietileno

Válvula de apertura rápida de  $\frac{3}{4}$ ":

- Marca: Crane
- Material: hierro fundido
- Tipo: placa

Válvula de control de 1" y de  $\frac{3}{4}$ ":

- Marca: GF
- Material: PVC
- Tipo: bola

Válvula de accionamiento rápido de 1":

- Marca: GF
- Material: PVC

### 4.4 Selección del sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos es un proceso de obtener o generar información en forma real y automatizada mediante señales analógicas o digitales, es por ello que se debe realizar un estudio minucioso de las variables a medir como también identificar si son señales de entrada analógicas o digitales. Para el banco de pruebas chimenea de equilibrio, las variables a considerar para la selección del módulo de adquisición de

datos son la presión y nivel del agua, que generan señales analógicas, entonces es preciso la selección de una tarjeta NI USB-6009 DAQ Multifunción de 14 Bits, 48 kS/s.

Figura 64. NI USB-6009.



Fuente: <http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/es/nid/201987>

El NI USB-6009 brinda funcionalidad DAQ básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es accesible para uso de estudiantes y lo suficientemente poderoso para aplicaciones de medida más sofisticadas.

Tabla 7. Especificaciones de NI USB-6009.

| General                           |                                      |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Producto                          | USB-6009                             |
| Familia de Productos              | DAQ Multifunción                     |
| Formato Físico                    | USB                                  |
| Número de Parte                   | 779026-01                            |
| Sistema Operativo/Objetivo        | Linux , Mac OS , Pocket PC , Windows |
| Familia de Productos DAQ          | Serie B                              |
| Tipos de Medida                   | Voltaje                              |
| Potencia USB                      | Energizado por Bus                   |
| Entrada Analógica                 |                                      |
| Canales                           | 4 , 8                                |
| Canales de una sola terminal      | 8                                    |
| Canales Diferenciales             | 4                                    |
| Resolución                        | 14 bits                              |
| Velocidad de Muestreo             | 48 kS/s                              |
| Máx. Voltaje de Entrada Analógica | 10 V                                 |

|                                       |                        |
|---------------------------------------|------------------------|
| Rango de Voltaje Máximo               | -10 V , 10 V           |
| Precisión Máxima del Rango de Voltaje | 7.73 mV                |
| Rango de Voltaje Mínimo               | -1 V , 1 V             |
| Mínima Precisión del Rango de Voltaje | 1.53 mV                |
| Número de Rangos                      | 8                      |
| Memoria Interna                       | 512 B                  |
| <b>Salida Analógica</b>               |                        |
| Canales                               | 2                      |
| Resolución                            | 12 bits                |
| Máx. Voltaje de Entrada Analógica     | 5 V                    |
| Rango de Voltaje Máximo               | 0 V , 5 V              |
| Precisión Máxima del Rango de Voltaje | 7 mV                   |
| Rango de Voltaje Mínimo               | 0 V , 5 V              |
| Mínima Precisión del Rango de Voltaje | 7 mV                   |
| Razón de Actualización                | 150 S/s                |
| Capacidad de Corriente Simple         | 5 mA                   |
| Capacidad de Corriente Total          | 10 mA                  |
| <b>E/S Digital</b>                    |                        |
| Canales Bidireccionales               | 12                     |
| Filtros de Entrada Programables       | No                     |
| Capacidad de Corriente Simple         | 8.5 mA                 |
| Capacidad de Corriente Total          | 102 mA                 |
| Máximo Rango de Entrada               | 0 V , 5 V              |
| Máximo Rango de Salida                | 0 V , 5 V              |
| <b>Contadores/Temporizadores</b>      |                        |
| Número de Contadores/Temporizadores   | 1                      |
| Rango Máximo                          | 0 V , 5 V              |
| Frecuencia Máxima de la Fuente        | 5 MHz                  |
| Resolución                            | 32 bits                |
| Niveles Lógicos                       | TTL                    |
| <b>Especificaciones Físicas</b>       |                        |
| Longitud                              | 8.51 cm                |
| Ancho                                 | 8.18 cm                |
| Altura                                | 2.31 cm                |
| Conector de E/S                       | Terminales de tornillo |

Fuente: <http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/es/nid/201987>

#### 4.5 Selección de los instrumentos de medición de variables y fuente de alimentación

**4.5.1 Transductores de presión.** Los criterios para la selección de transductores de presión se basa en la presión máxima que se mide en la tubería, con este parámetro la presión máxima que marca en el manómetro instalado en el primer tramo es de 35 psi.

Se seleccionaron transmisores de presión SITRANS P220, con señales de salida de corriente en mA:

- Uno de 0 – 100 psi.
- Dos de 0 – 60 psi.

Figura 65. Transmisor de presión SITRANS P220.



Fuente: [http://www.automation.siemens.com/sc-static/catalogs/catalog/pi/FI01/es/FI01\\_es\\_kap01.pdf](http://www.automation.siemens.com/sc-static/catalogs/catalog/pi/FI01/es/FI01_es_kap01.pdf)

#### *Beneficios:*

- Alta precisión de medida.
- Caja de acero inoxidable robusta.
- Alta resistencia a la sobrecarga.
- Para fluidos corrosivos y no corrosivos.
- Para medir la presión de gases, líquidos y vapores.
- Diseño compacto.
- Sin junta.

*Aplicación.* El transmisor de presión SITRANS P220 para presión relativa se utiliza en los siguientes sectores industriales:

- Fabricación de maquinaria.
- Construcción naval.
- Energía.
- Química.
- Abastecimiento de agua.

Tabla 8. Especificaciones del transmisor de presión SITRANS P220.

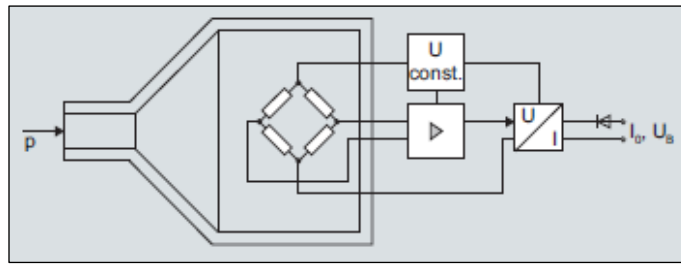
| Campo de aplicaciones           |   |
|---------------------------------|---|
| Medición de la presión relativa | Líquidos, gases y vapores                                       |
| Modo de operación               |   |
| Principio de medición           | Célula de medida piezorresistiva (membrana de acero inoxidable) |
| Magnitud de medida              | Presión relativa  |
| Entrada                         |   |
| Rango de medida                 |   |
| Presión relativa:               |   |
| • métrico                       | 2,5 ... 600 bar (36 ... 8700 psi)                               |
| • Rango de medida para EE.UU.   | 30 ... 8700 psi   |
| Salida                          |   |
| Señal de corriente              | 4 ... 20 mA   |
| • Carga                         | (UB - 10 V)/0.02 A  |
| • Alimentación auxiliar UB      | 7 ... 33 V CC (10 ... 30 V para Ex)                             |
| Señal de tensión                | 0 ... 10 V CC   |
| • Carga                         | $\geq 10 \text{ k}\Omega$                                       |
| • Alimentación auxiliar UB      | 12 ... 33 V CC  |
| • Consumo de corriente          | $< 7 \text{ mA at } 10 \text{ k}\Omega$                         |
| Característica                  | lineal creciente  |

Fuente: [http://www.automation.siemens.com/sc-static/catalogs/catalog/pi/FI01/es/FI01\\_es\\_kap01.pdf](http://www.automation.siemens.com/sc-static/catalogs/catalog/pi/FI01/es/FI01_es_kap01.pdf)

*Diseño.* El transmisor de presión está formado por una célula de medida piezorresistiva con membrana, montado en una caja de acero inoxidable. Puede conectarse eléctricamente con un conector conforme al código EN 175301-803-A (IP65), un conector redondo M12 (IP67). La señal de salida puede ser 4 a 20 mA o 0 a 10 V.

*Modo de operación.* La célula de medida de acero inoxidable dispone de un puente de resistencias de película gruesa, al cual se transmite la presión de servicio  $p$  a través de una membrana de acero inoxidable.

Figura 66. Diagrama de función SITRANS P220.



Fuente: [http://www.automation.siemens.com/sc-static/catalogs/catalog/pi/FI01/es/FI01\\_es\\_kap01.pdf](http://www.automation.siemens.com/sc-static/catalogs/catalog/pi/FI01/es/FI01_es_kap01.pdf)

La tensión de salida de la célula de medida se conduce al amplificador y se transforma en una corriente de salida de 4 a 20 mA o en una tensión de salida de 0 a 10 Vcd. La corriente y la tensión de salida son linealmente proporcionales a la presión de entrada. Es importante tomar otras consideraciones como salidas en tensión o en corriente, compatibilidad química, capacidad de soportar sobrepresiones, margen de temperatura.

**4.5.2 Fuente de alimentación.** Los transductores de presión SITRANS P220, necesitan una excitación de 7 a 33 Vcd según especificaciones técnicas del fabricante. Entonces se ha seleccionado una fuente de alimentación auxiliar que proporcione 12 V tipo KY-24W-12L.

La fuente de alimentación KY-24W-12L, es un circuito o dispositivo eléctrico activo que provee una diferencia de potencial o una corriente de manera confiable para que otros circuitos puedan funcionar. La fuente de alimentación se encarga de convertir la tensión alterna de la red industrial en una tensión casi continua. Para esto consta de un rectificador, fusibles y otros componentes que le permiten recibir la electricidad, regularla, filtrarla y adaptarla a las necesidades de los sensores.

Figura 67. Fuente de alimentación KY-24W-12L.



Fuente: <http://www.reguerobaterias.es/archivos/media/rs-35-spec.pdf>



## CAPÍTULO V

### 5. MONTAJE DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS EN EL BANCO DE PRUEBAS DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO

#### 5.1 Tecnología de montaje

La instalación del banco de pruebas chimenea de equilibrio ha sido preparado con fines docentes, La cual se conforma por una parte hidráulica, en la que se reproducirá el fenómeno de golpe de ariete, y una parte de instrumentación para adquisición de datos con las que se visualiza las variables a medir.

**5.1.1** *Parte hidráulica.* El sistema hidráulica está constituido por la bomba centrífuga instalada con cabeza neta de succión positiva disponible (NPSHD), con fácil accesibilidad de realizar mantenimiento.

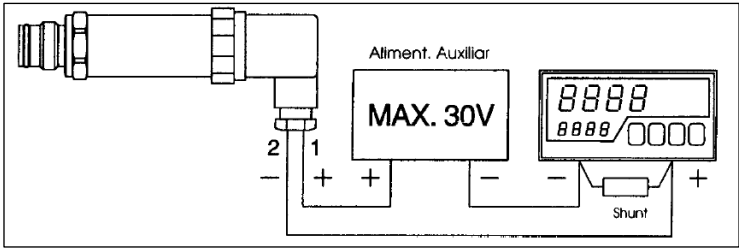
La tubería de succión como de descarga de la bomba se encuentran sostenidas independientemente, con el fin de evitar deformaciones y mejorar la estabilidad de la misma. Además existe un reservorio con capacidad suficiente (150 lt) de flujo de agua para el llenado del depósito (37,7 lt).

También se tiene dos tubos de acero inoxidable con diámetro interno de 20 mm instalados paralelamente de la misma longitud de 3m, para generar el mismo efecto del fenómeno de golpe de ariete, indicando además que, un tramo tiene instalado la chimenea de equilibrio. En un extremo de las tuberías se encuentran acopladas las válvulas de accionamiento rápido y de apertura rápida respectivamente. La tubería de retorno del depósito tiene un diámetro de 2", mientras que la tubería de descarga tiene un diámetro de 1", con el fin de mantener el nivel del depósito constante y de realimentar al reservorio.

**5.1.2** *Adquisición de datos.* Los transductores de presión SITRANS P220 en el primer tramo se pueden colocar en dos puntos, en la mitad de la tubería y antes de la válvula de accionamiento rápido, para obtener un mejor resultado del análisis, se instala en la mitad (1.5 m) y antes de la válvula (3m).

Las señales de entrada a la DAQ dependen de la conexión elegida dado por el fabricante, la conexión realizada es a dos hilos que consiste en usar dos terminales del transductor de presión rojo 1(+) y verde 2(-). En este tipo de conexión el transductor de presión proporciona una intensidad entre 4-20 mA, que posteriormente se transformara en voltaje entre 1-5 V mediante una resistencia de 250  $\Omega$  colocada entre los terminales de la DAQ.

Figura 68. Conexión a dos hilos.

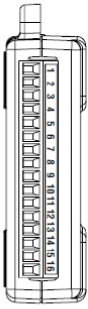


Fuente: <http://www.spiraxsarco.com/es/pdfs/IM/el2610.pdf>

*Interface.* La interface para conectar al computador funciona a modo de puente entre los transductores de presión y la adquisición de datos NI USB 6009. Dicha interface incorpora un sistema de acondicionamiento de señales y un filtro de eliminación de ruidos, además de unos reguladores manuales mediante potenciómetros para el ajuste del offset de la señal y la ganancia de la misma.

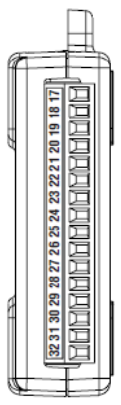
*Tarjeta de adquisición.* El equipo cuenta con una tarjeta Nacional Instruments NI USB 6009, que cuenta con 8 entradas analógicas. Con conexión al puerto USB.

Tabla 9. Terminal análogo.

| Modulo  | Terminal | Señal, Nodo Simple | Señal, Diferencial |
|---|----------|--------------------|--------------------|
|  | 1        | GND                | GND                |
|   | 2        | AI 0               | AI 0+              |
|   | 3        | AI 4               | AI 0-              |
|   | 4        | GND                | GND                |
|   | 5        | AI 1               | AI 1+              |
|   | 6        | AI 5               | AI 1-              |
|   | 7        | GND                | GND                |
|   | 8        | AI 2               | AI 2+              |
|   | 9        | AI 6               | AI 2-              |
|   | 10       | GND                | GND                |
|   | 11       | AI 3               | AI 3+              |
|   | 12       | AI 7               | AI 3-              |
|   | 13       | GND                | GND                |
|   | 14       | AO 0               | AO 0               |
|   | 15       | AO 1               | AO 1               |
|   | 16       | GND                | GND                |

Fuente:[http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/478/1/digital\\_17602.pdf](http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/478/1/digital_17602.pdf)

Tabla 10. Terminal digital.

| Modulo  | Terminal | Señal |
|---|----------|-------|
|  | 17       | PO.0  |
|   | 18       | PO.1  |
|   | 19       | PO.2  |
|   | 20       | PO.3  |
|   | 21       | PO.4  |
|   | 22       | PO.5  |
|   | 23       | PO.6  |
|   | 24       | PO.7  |
|   | 25       | PI.0  |
|   | 26       | PI.1  |
|   | 27       | PI.2  |
|   | 28       | PI.3  |
|   | 29       | PFI 0 |
|   | 30       | +2.5V |
|   | 31       | +5V   |
|   | 32       | GND   |

Fuente:[http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/478/1/digital\\_17602.pdf](http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/478/1/digital_17602.pdf)

*Ordenador y software de adquisición.* El ordenador debe tener características compatibles con el software LabVIEW siendo como mínimo un procesador Intel Core i7 y una memoria RAM de 4,00 GB. El Software utilizado para la programación es LabVIEW Control Design Assistant 2012.

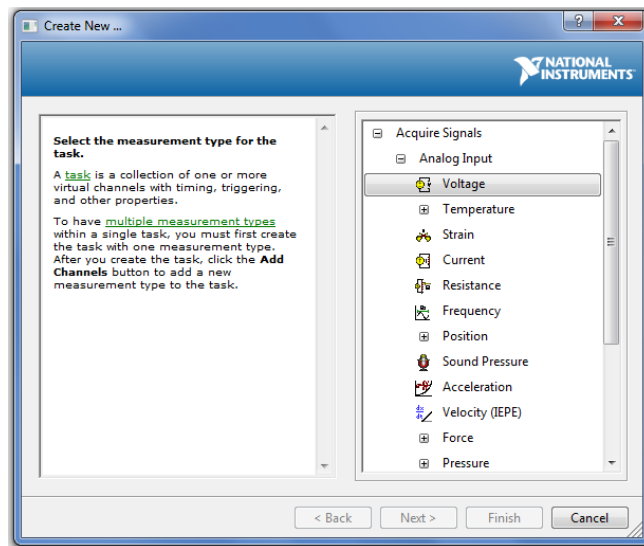
## 5.2 Automatización de la toma de datos del banco de prueba chimenea de equilibrio

**5.2.1** *Adquisición de datos y procesamiento de señales.* Previo a la adquisición de datos se inicia con la configuración de la tarjeta DAQ assistant, para crear los VI's.

Se configura los canales o entradas analógicas de la tarjeta NI USB 6009, para digitalizar la señal analógica del transmisor de presión y llevar al computador por medio del cable usb.

Para la adquisición de datos, en la parte de diagrama de bloques seleccionamos DAQ Assistant la cual permite la adquisición de señales del mundo exterior, para configurar todos los parámetros seleccionamos la opción de adquirir voltaje, marcamos el canal para P1 la entrada AI0 del transductor de presión de 0-100 psi, para P2 la entrada AI4 del transductor de presión de 0-60 psi y para P3 la entrada AI5 del transductor de presión de 0-60 psi. La configuración de los canales se realiza mediante el botón añadir señal analógica.

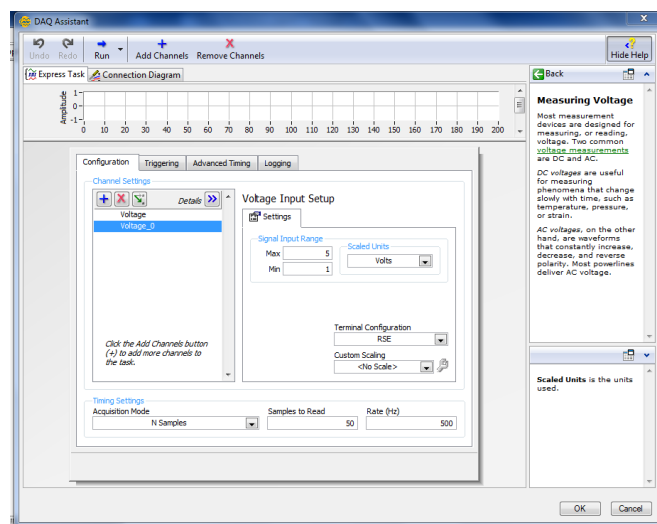
Figura 69. Configuración de la tarjeta NI USB 6009.



Fuente: Autores.

En la configuración de los terminales se selecciona a modo común RSE (Señal de Voltaje con Referencia), para trabajar con un terminal del transductor a GND de la DAQ o terminal de referencia y otro terminal recibirá el valor de voltaje que pretendo adquirir.

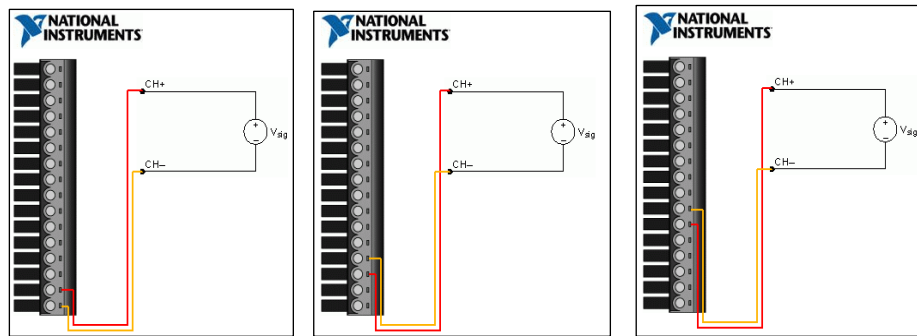
Figura 70. Configuración de parámetros para la adquisición de datos.



Fuente: Autores.

Finalizado el ingreso de los parámetros para el primer canal P1 (0-60 psi), añadimos más canales para P2 (0-30 psi) y P3 (0-60 psi) con sus respectivos parámetros para la adquisición de datos. Los circuitos de conexión de todos los canales conectados a los transmisores de presión se observa a continuación.

Figura 71. Selección de canales para transmisores de presión.

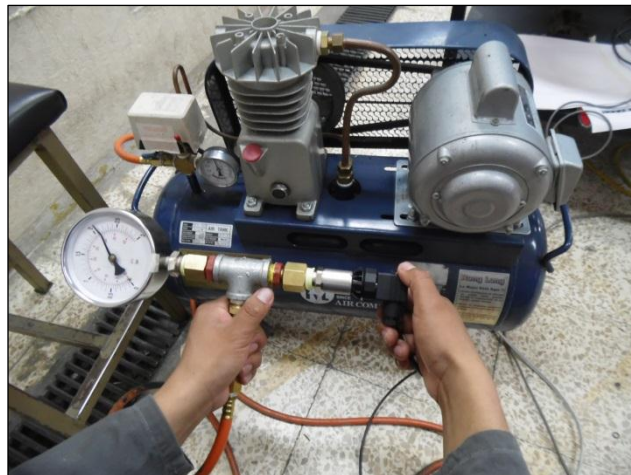


Fuente: Autores.

**5.2.2 Calibración de los transmisores de presión SITRANS P220.** El propósito de la calibración de los transmisores de presión, es verificar y observar en la gráfica presión vs voltaje, si la señal que generan estos transmisores es lineal creciente o si es una curva la cual necesitaría acondicionamiento de señal.

También es importante señalar que la calibración, consiste en ajustar los transmisores de presión para que exista coincidencia en los valores de las variables detectados en la salida proporcional del instrumento (1 a 5 Voltios) con los cambios de la variable en el proceso.

Figura 72. Calibración de transmisores de presión.

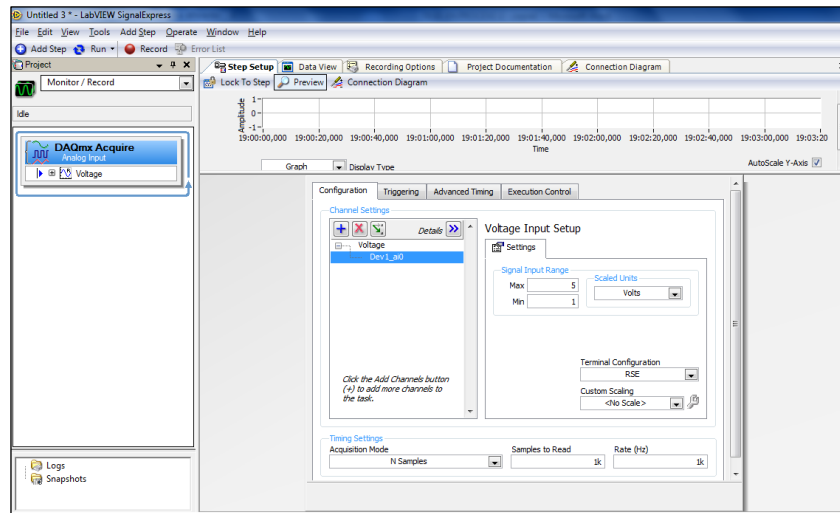


Fuente: Autores.

Para la calibración del transmisores de presión SITRANS P220 (0-60 psi), fue necesario un banco de calibración, que consiste en un manómetro patrón, compresor de aire (0-240 psi) y el software LabView 2012 Signal Express. Previo a realizar la calibración se procede con la configuración de los parámetros en el Software Signal

Express para lo cual creamos una nueva tarea para la adquisición de datos como se muestra a continuación.

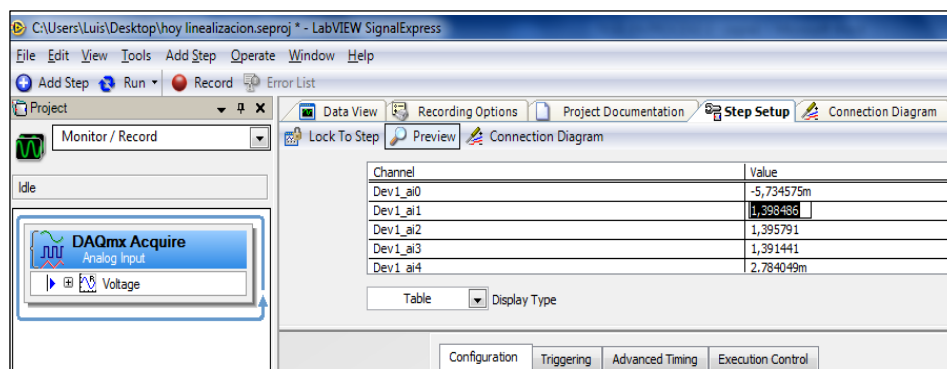
Figura 73. Configuración de parámetros para la calibración.



Fuente: Autores

Finalizado la configuración de los parámetros de la tarjeta y selección de los canales, se procede con la conexión del manómetro y el transmisor de presión al compresor en una misma línea, se ejecuta el botón Run para iniciar la visualización de los valores de voltaje, cabe indicar que el máximo es 5 Vcd.

Figura 74. Toma de valores de voltaje.



Fuente: Autores

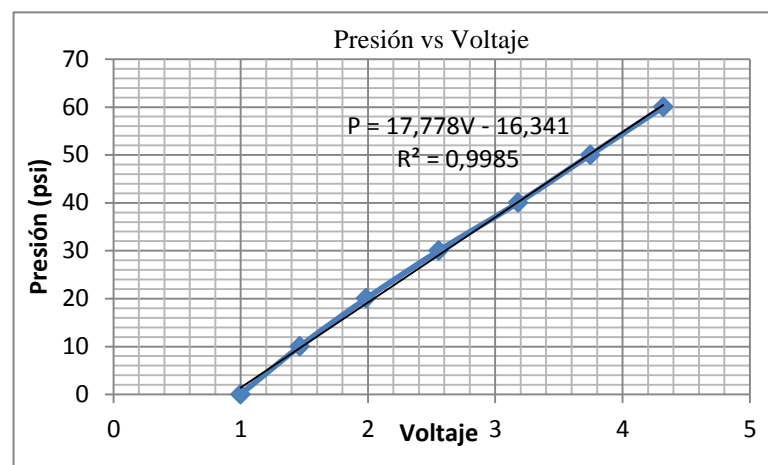
Se pone en marcha el compresor tomando los valores de presión en el manómetro cada 10 psi y en el mismo instante los valores de voltaje presentados en el Software Signal Express hasta llegar al máximo valor de 5 Vcd, llegado a este punto se detiene el compresor y el programa. Este procedimiento realizamos en 5 ocasiones y tomamos el promedio, finalmente graficamos en Excel como se indica a continuación.

Tabla 11. Datos de presión y voltaje.

| Vcd    | P  |
|--------|----|
| 0,998  | 0  |
| 1,463  | 10 |
| 1,985  | 20 |
| 2,556  | 30 |
| 3,178  | 40 |
| 3,7462 | 50 |
| 4,32   | 60 |

Fuente: Autores

Figura 75. Gráfica de presión vs voltaje.



Fuente: Autores

Se observa la gráfica que es lineal creciente y en la ecuación la presión está en función de voltaje que nos servirá para programar en el diagrama de bloque de LabView. Caso similar se realiza la calibración para el transmisor de presión de 0-30 psi.

### 5.3 Representación de variables medidas en el programa LabVIEW

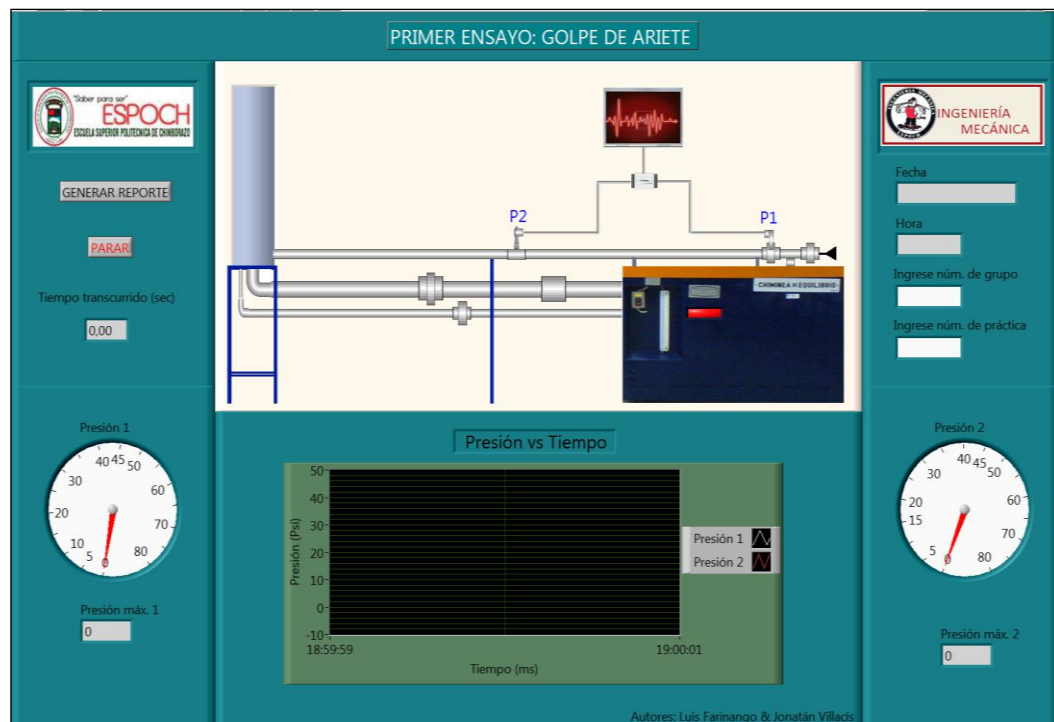
El software LabView permite adquirir datos de las variables a medir, que consiste en una parte frontal del VI diseñado exclusivamente para cada ensayo del banco de pruebas de chimenea de equilibrio, puede contener botones, interruptores, pulsadores, gráficas y otros controles e indicadores que permiten al usuario monitorear, registrar y controlar parámetros de los procesos de interés. La otra parte es la programación gráfica en la cual se detalla el funcionamiento de los ensayos en el diagrama de bloques.

**5.3.1 Descripción del panel frontal del primer ensayo: Golpe de ariete.** Para el primer ensayo, el panel frontal del VI constituye un diagrama representativo que tiene las siguientes características:

- Botón de generar reporte.
- Botón de parar.
- Fecha de la práctica.
- Hora de la práctica.
- Control de texto para ingresar el número de grupo.
- Control de texto para ingresar número de práctica.
- Indicador de presión 1 de 0 a 80 psi.
- Indicador de presión 2 de 0 a 80 psi.
- Indicadores digitales de presión máxima 1 y presión máxima 2.
- Indicador de las gráficas de las presiones vs tiempo.
- Indicador led del botón parar.

Contiene un push button para seleccionar la plantilla de generación del reporte que envía a la plantilla de Excel con el nombre de golpe de ariete. También presenta dos tablas para visualizar datos de presión 1 vs tiempo y presión 2 vs tiempo.

Figura 76. Panel frontal: primer ensayo.



Fuente: Autores.

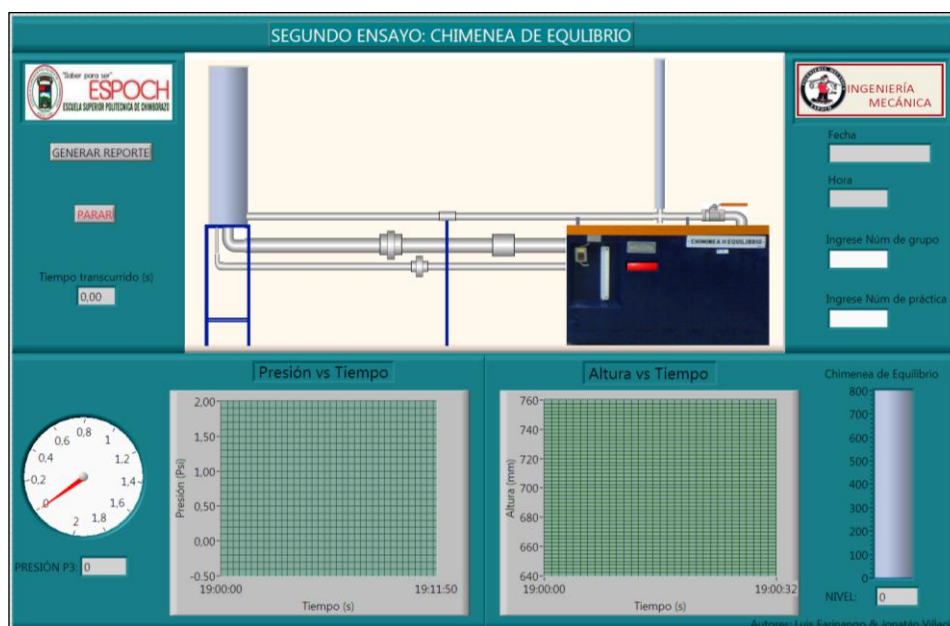


**5.3.2 Descripción del panel frontal del segundo ensayo: Chimenea de equilibrio.**  
 Para el segundo ensayo, el panel frontal del VI constituye un diagrama representativo que tiene las siguientes características:

- Botón de generar reporte.
- Botón de parar.
- Indicador de tiempo.
- Fecha de la práctica.
- Hora de la práctica.
- Control de texto para ingresar el número de grupo.
- Control de texto para ingresar número de práctica.
- Indicador de presión de 0 a 2 psi.
- Indicador digital de presión P3.
- Indicador de nivel de 0 a 800 mm.
- Indicador digital de nivel.
- Indicador de gráfica Presión vs tiempo.
- Indicador de gráfica Altura vs tiempo
- Indicador led del botón parar.

Contiene un push button para seleccionar la plantilla de generación del reporte que envía a la plantilla de Excel con el nombre de chimenea de equilibrio.

Figura 77. Panel frontal: segundo ensayo.



Fuente: Autores.

También se presentan tablas para visualizar datos, de altura vs tiempo y presión vs tiempo.

El diagrama de bloques contiene el código de fuente gráfico para la ejecución del VI. Los objetos como controladores, gráficas e indicadores creados en el panel frontal de cada ensayo aparecen como terminales de ícono en los diagramas de bloque, en la cual los lazos conectan las terminales de control e indicadores con el VI Express. Los datos fluyen a través de los lazos, de los controles al VI que llevan a los indicadores.

Para el procesamiento y generación de información se pueden configurar basándose en una planilla de Excel previamente creada.

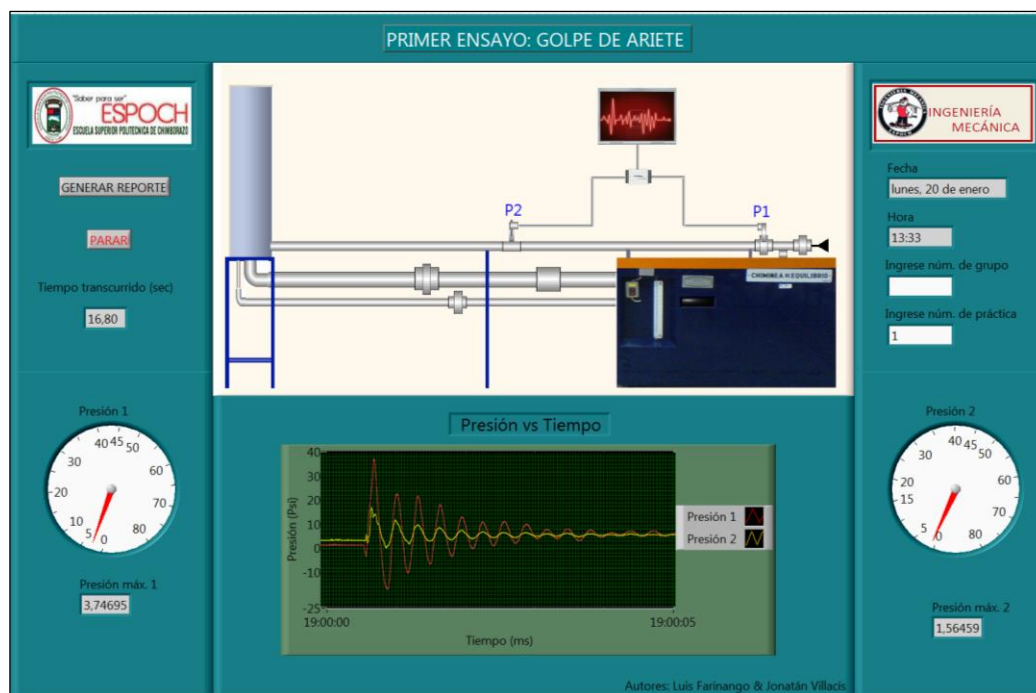
## CAPÍTULO VI

### 6. FASE EXPERIMENTAL

#### 6.1 Realización de las pruebas

Finalizado el montaje de equipos y la programación del VI para cada ensayo, se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento previas para ejecutar los laboratorios. La adquisición de datos para el primer ensayo, se procede de acuerdo a los pasos mencionados en las guías de laboratorio. El golpe de ariete y las oscilaciones producidas por el cierre instantáneo de la válvula se visualizan en el panel frontal del diagrama representativo para los transmisores de presión P1 y P2.

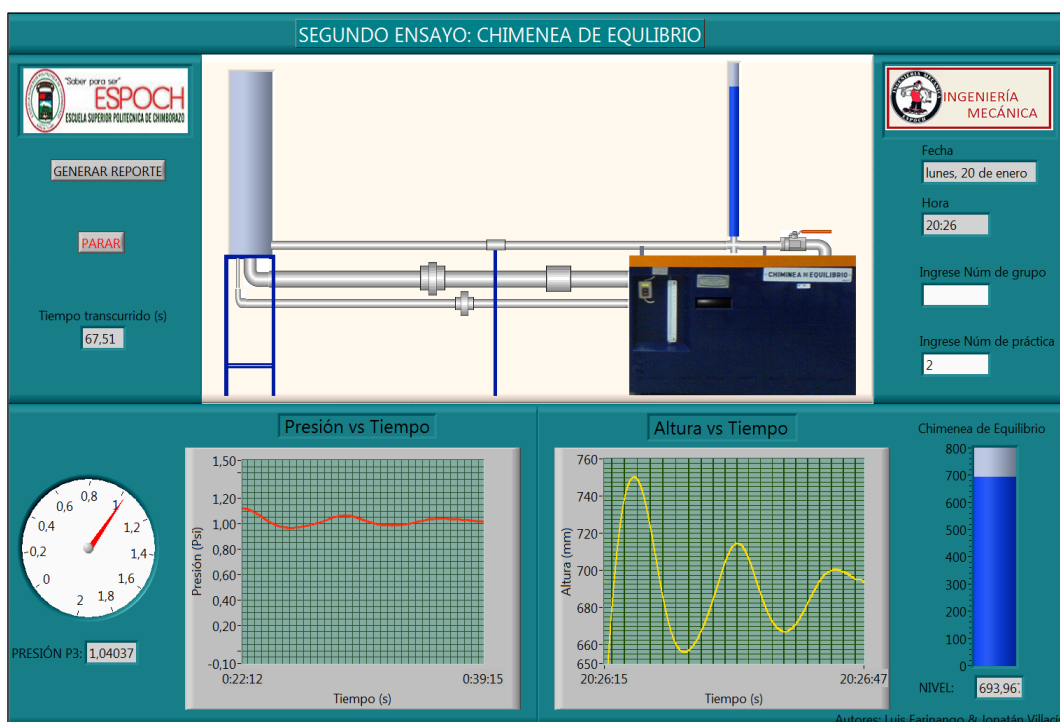
Figura 78. Pruebas del primer ensayo.



Fuente: Autores.

La adquisición de datos para el segundo ensayo, se procede de acuerdo a los pasos mencionados en las guías de laboratorio. Las oscilaciones producidas por el cierre instantáneo de la válvula, se visualizan en la chimenea de equilibrio y en el panel frontal del diagrama representativo medido por el transmisores de presión P3 (0-60 psi).

Figura 79. Pruebas del segundo ensayo.



Fuente: Autores.

## 6.2 Resultados de las pruebas

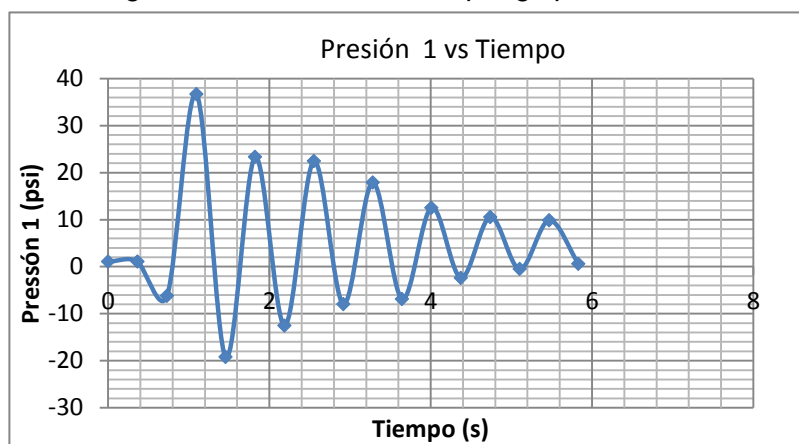
A la vez con la visualización de las oscilaciones en el software del primer ensayo se presentan el reporte de datos cada transmisor de presión (0-60 psi) y (0-30 psi), con los cuales se graficó, como se indica a continuación.

Tabla 12. Datos de presión 1 y tiempo.

| Tiempo (s) | Presión 1 (psi) |
|------------|-----------------|
| 0          | 1,0623          |
| 0,364      | 1,0726          |
| 0,73       | -6,2312         |
| 1,0941     | 36,7123         |
| 1,4581     | -19,2314        |
| 1,8231     | 23,3241         |
| 2,1871     | -12,5423        |
| 2,552      | 22,4322         |
| 2,9166     | -7,9512         |
| 3,2811     | 17,8652         |
| 3,6457     | -6,8512         |
| 4,0102     | 12,5483         |
| 4,3748     | -2,3542         |

Fuente: Autores.

Figura 80. Presión 1 vs tiempo: golpe de ariete.



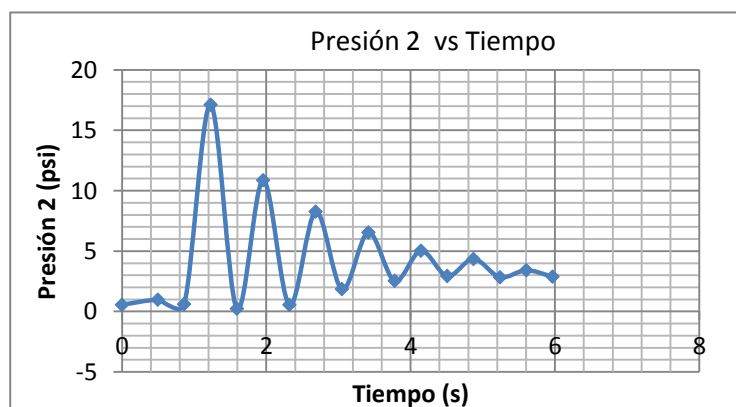
Fuente: Autores.

Tabla 13. Datos de presión 2 y tiempo.

| Tiempo (s) | Presión 2(psi) |
|------------|----------------|
| 0          | 0,5623         |
| 0,4965     | 0,9726         |
| 0,8625     | 0,6113         |
| 1,2266     | 17,1225        |
| 1,5906     | 0,2456         |
| 1,9556     | 10,8542        |
| 2,3196     | 0,5575         |
| 2,6845     | 8,2541         |
| 3,0491     | 1,8455         |
| 3,4137     | 6,5424         |
| 3,7782     | 2,5452         |
| 4,1428     | 5,0213         |
| 4,5073     | 2,9433         |

Fuente: Autores.

Figura 81. Presión 2 vs tiempo: golpe de ariete.



Fuente: Autores.

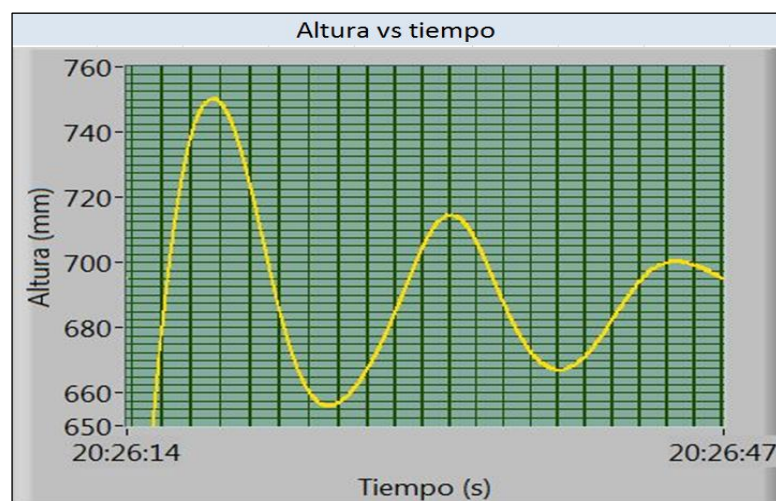
El reporte de las oscilaciones y los datos del segundo ensayo se presentan en la planilla de Excel, como se indica a continuación.

Tabla 14. Datos de altura y tiempo.

| Tiempo (s) | Altura (mm) |
|------------|-------------|
| 52,077     | 663,8081    |
| 52,954     | 678,3185    |
| 53,091     | 681,2048    |
| 53,9121    | 700,4923    |
| 54,0291    | 703,2192    |
| 54,9741    | 718,4961    |
| 55,0912    | 719,0085    |
| 55,9132    | 712,9825    |
| 56,9793    | 690,1639    |
| 57,0983    | 687,565     |
| 57,9323    | 673,2127    |
| 58,0493    | 671,7665    |
| 58,9994    | 665,8047    |
| 59,2054    | 665,5543    |
| 59,9784    | 668,1592    |
| 60,2154    | 670,1997    |
| 60,8935    | 678,4671    |
| 61,0705    | 680,9939    |
| 61,8995    | 692,5073    |
| 62,0746    | 694,6388    |
| 62,8716    | 700,9904    |

Fuente: Autores.

Figura 82. Altura vs tiempo: chimenea de equilibrio.



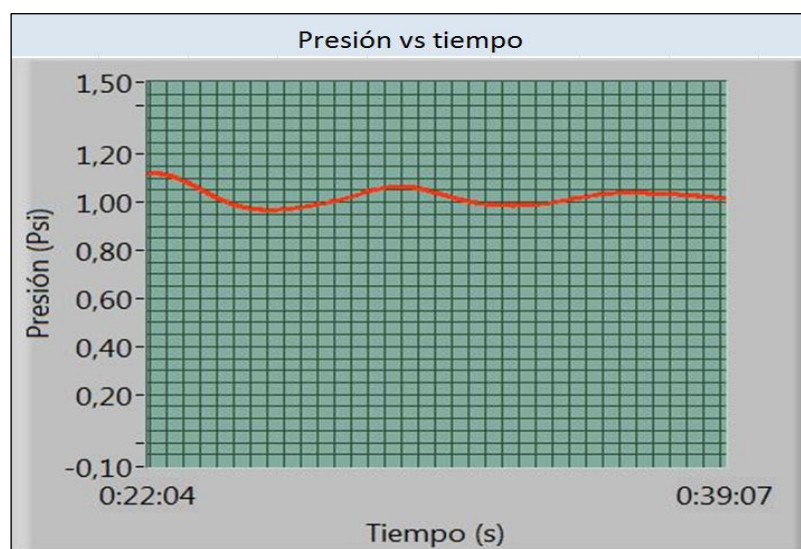
Fuente: Autores.

Tabla 15. Datos de presión 3 y tiempo.

| Tiempo (s) | Presión3 (psi) |
|------------|----------------|
| 52,077     | 0,9842         |
| 52,954     | 1,0057         |
| 53,091     | 1,0099         |
| 53,9121    | 1,0385         |
| 54,0291    | 1,0426         |
| 54,9741    | 1,0652         |
| 55,0912    | 1,066          |
| 55,9132    | 1,0571         |
| 56,9793    | 1,0232         |
| 57,0983    | 1,0194         |
| 57,9323    | 0,9981         |
| 58,0493    | 0,996          |
| 58,9994    | 0,9871         |
| 59,2054    | 0,9867         |
| 59,9784    | 0,9906         |
| 60,2154    | 0,9936         |
| 60,8935    | 1,0059         |
| 61,0705    | 1,0096         |
| 61,8995    | 1,0267         |
| 62,0746    | 1,0299         |
| 62,8716    | 1,0393         |
| 63,0176    | 1,04           |
| 63,8447    | 1,0388         |

Fuente: Autores.

Figura 83. Presión vs tiempo: chimenea de equilibrio.



Fuente: Autores.

### 6.3 Análisis de resultados

Para el análisis de oscilaciones obtenidas en el programa, se realiza una comparación de las variaciones de presión que existe entre el ensayo uno (sin la chimenea de equilibrio), con el ensayo dos (con la chimenea de equilibrio).

En el primer ensayo, el transmisor de presión P1 marca una presión de 36.7 psi y en el transmisor de presión P2 marca 17.1 psi, en el instante del cierre de la válvula.

Mientras que en el segundo ensayo, el transmisor de presión P3 marca 1.04 psi, en el momento del cierre instantáneo de la válvula, esto explica que con una instalación de la chimenea de equilibrio podemos reducir las sobrepresiones producidas por el golpe de ariete que tiene graves consecuencias en la tubería, como el desgaste de las paredes internas o a su vez la explotación de válvulas, entre otras.

Para la comparación de las variaciones de presión, se realizó la toma de datos en diez ensayos como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 16. Cuadro comparativo de P1, P2 y P3.

| P1   | P2   | P3   |
|------|------|------|
| 36,7 | 16,9 | 1,03 |
| 35,8 | 16,5 | 0,99 |
| 36,5 | 17,1 | 1,01 |
| 36,7 | 16,7 | 0,98 |
| 35,9 | 17,0 | 1,04 |
| 36,6 | 17,1 | 1,02 |
| 35,8 | 16,8 | 1,04 |
| 36,6 | 16,6 | 0,99 |
| 36,7 | 16,3 | 0,97 |
| 36,2 | 16,0 | 1,04 |

Fuente: Autores.

### 6.4 Plan de mantenimiento

El plan de mantenimiento consiste en conocer la metodología para el mantenimiento del banco de pruebas chimenea de equilibrio. Comprende realizar los trabajos de mantenimiento periódico programados por personal con conocimiento acerca de este tipo de banco de pruebas. Ver anexo D.



## **6.5 Manual de operaciones**

Antes, durante y después de la operación del banco de pruebas se debe tener presente las siguientes consideraciones:

### **6.5.1** *Antes de empezar a operar el banco.*

- Se debe verificar el nivel del líquido en el reservorio, asegurando que el suministro de agua hacia la bomba se encuentre disponible.
- Inspeccionar que en el reservorio no exista objetos que impidan la circulación del fluido y ocasione taponamientos.
- Conectar la fuente de energía eléctrica de la bomba, módulo de adquisición de datos y el computador.
- Asegurarse que todo el equipo, así como los instrumentos de medición y protección estén en perfecto orden de trabajo listos para usarse.
- Comprobar que el módulo de automatización esté conectado al computador por medio USB.
- El banco de pruebas debe estar libre de cualquier objeto que no sea parte del mismo.
- Verificar que las válvulas de paso estén debidamente cerradas.

### **6.5.2** *Puesta en marcha inicial.*

- Encender el computador y abrir los programas.
- Encender la bomba mediante la botonera de encendido.

### **6.5.3** *Durante la operación.*

- Inspeccionar el correcto funcionamiento de la bomba, no dejar que se recaliente.
- Abrir el tapón del reservorio para permitir la recirculación de agua a la bomba.
- Evitar estrangular la salida de caudal de la bomba pues esto hace que la bomba trabaje con dificultad.

### **6.5.4** *Después de la operación.*

- Desconectar el suministro eléctrico de la fuente de alimentación y la bomba.
- Evacuar el agua del reservorio.

- Limpiar si han existido fugas de agua.

## **6.6 Descripción de ensayos y guías del laboratorio**

**6.6.1 Descripción de ensayos.** En el primer ensayo, el cierre rápido de la válvula de accionamiento genera un fuerte golpe de ariete en el primer tramo de tubo. La energía cinética del agua es convertida en energía de presión. El golpe de ariete y las oscilaciones subsecuentes son registrados por medio de dos transductores de presión en el tramo de tubo instalados a 1,5 m (0 – 60 psi) y 3,0 m (0 – 60 psi) del depósito y representados en el software.

En el segundo ensayo se genera un golpe de ariete mediante el cierre rápido de la válvula de apertura rápida. Durante el frenado abrupto de la masa de agua se libera energía cinética que es convertida en energía potencial en la chimenea de equilibrio. Las vibraciones de presión creadas son registradas por un transductor de presión (0 – 60 psi) situado en la base de la chimenea de equilibrio a 3,0 m del depósito y representadas en el software. Además, las oscilaciones del nivel de agua son visibles en la chimenea de equilibrio. Las guías de laboratorio representan los fundamentos paso a paso para los distintos ensayos.

### **6.6.2 Guías del laboratorio.**

## **PRIMER ENSAYO**

### **TEMA: GOLPE DE ARIETE**

#### **1) OBJETIVO:**

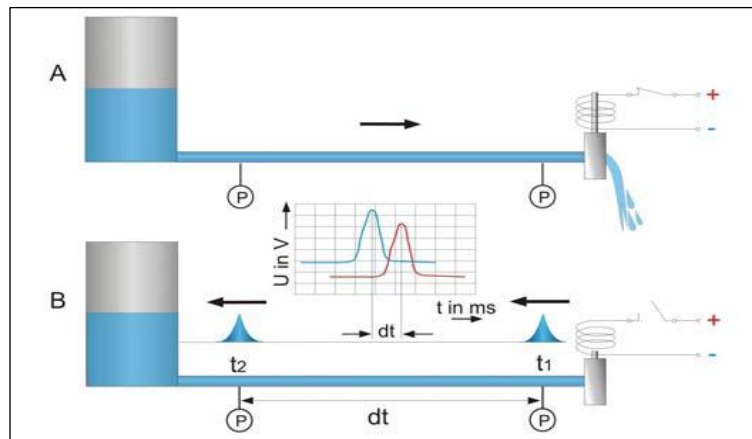
- Generar el golpe de ariete mediante el cierre instantáneo de la válvula de accionamiento rápido.
- Visualizar la velocidad de propagación del golpe ariete en la tubería por medio de LabVIEW.

#### **2) EQUIPO:**

- Banco de pruebas “Chimenea de Equilibrio”.
- Módulo de adquisición de datos:
  - NI USB 6009.
  - Fuente de alimentación de transductores.

- Transductores de presión:
  - SITRANS P220, 0-60 psi.
  - SITRANS P220, 0-100 psi.
- Computadora con Software LabVIEW.

### 3) ESQUEMA DEL EQUIPO



### 4) MARCO TEÓRICO

El golpe de ariete se produce en los conductos al cerrar o abrir una válvula y al poner en marcha o parar una máquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el caudal. Este fenómeno se puede apreciar en las centrales hidroeléctricas.

### 5) PROCEDIMIENTO:

- Previamente al desarrollo del laboratorio se debe verificar el nivel del líquido en el reservorio.
- Conectar la fuente de energía eléctrica de la bomba, módulo de adquisición de datos y el computador.
- Encender el computador e ingresar al programa de adquisición de datos de la Chimenea de Equilibrio.
- Cerrar la válvula de accionamiento rápido y la válvula de apertura rápida.
- Encender la bomba centrífuga.
- Esperar hasta alcanzar el nivel de agua en el depósito (690 mmca en CH).
- Ejecutar el programa.
- Abrir la válvula de accionamiento rápido y esperar un tiempo de 10 segundos como mínimo, para luego cerrar la misma y así producir el golpe de ariete.

- Analizar las curvas obtenidas de la variación de presión de los transductores en el panel frontal de LabVIEW, de ser necesario repetir el paso anterior.
- Detener el programa con el botón *parar*.
- Generar el reporte de datos en la hoja de cálculos Excel, pulsando el botón *generar reportes*.
- Apagar la bomba.
- Desconectar el banco de pruebas.

## **6) GENERACIÓN DE DATOS**

## **7) TABLA DE RESULTADOS**

## **8) CUESTIONARIO**

- Graficar  $\Delta p$  vs  $t$

## **9) CONCLUSIONES**

## **10) RECOMENDACIONES**

## **11) BIBLIOGRAFÍA**

## **SEGUNDO ENSAYO**

### **TEMA: CHIMENEA DE EQUILIBRIO**

#### **1) OBJETIVO:**

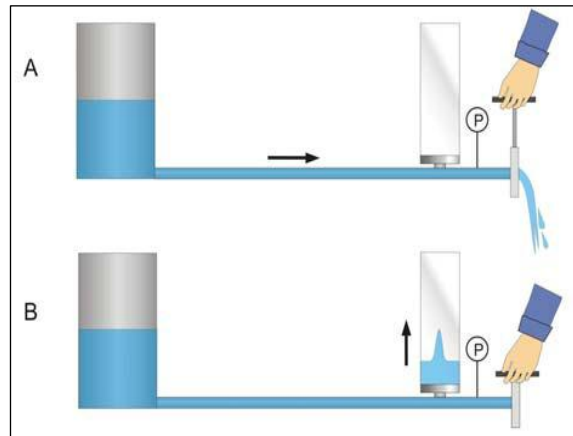
- Conocer el funcionamiento y la aplicación de la chimenea de equilibrio.
- Observar la transformación de energía cinética en energía potencial en la chimenea equilibrio producida por el golpe de ariete.

#### **2) EQUIPO:**

- Banco de pruebas "Chimenea de Equilibrio".
- Módulo de adquisición de datos:
  - NI USB 6009.
  - Fuente de alimentación de transductores.
- Transductor de presión:
  - SITRANS P220, 0-60 psi.

- Computadora con Software LabVIEW.

### 3) ESQUEMA DEL EQUIPO



### 4) MARCO TEÓRICO

Las chimeneas de equilibrio, son túneles verticales abiertos que se sitúan cerca del elemento que provoca el golpe de ariete. De esta forma, la condición de contorno se transforma en la de un depósito (no ideal), convirtiendo la pulsación de alta intensidad y frecuencia del golpe de ariete en una pulsación de baja intensidad y frecuencia, correspondiente a una oscilación en masa. Es habitual su utilización en centrales hidráulicas para proteger los túneles de hormigón anteriores a las tuberías forzadas.

- **ALTURA MÁXIMA IDEAL ( $Y_{m\acute{a}x}$ ):**

$$Y_{m\acute{a}x} = \frac{Q}{A_{ch}} \sqrt{\frac{A_{ch} * L}{A_c * g}} = v_{ch} \sqrt{\frac{V_{ch}}{A_c * g}}$$

Dónde:

$Y_{m\acute{a}x}$ : Altura máxima del agua en la chimenea.

$Q$ : Caudal que circula por la conducción.

$A_{ch}$ : Área transversal de la chimenea de equilibrio.

$A_c$ : Área transversal de la conducción.

$L$ : Longitud de la chimenea de equilibrio.

$V_{ch}$ : Volumen de la chimenea de equilibrio.

$v_{ch}$ : Velocidad en la chimenea.

$g$ : Gravedad  $\left(981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}\right)$ .

- **ALTURA MÁXIMA REAL ( $Y_E$ ).** Si se considera las pérdidas en la tubería de presión.

$$Y_E = z_e * y_e$$

Dónde:

$y_e$  = Y máx.

$z_e$  = Factor de pérdida de carga por efecto del golpe de ariete.

$$z_e = 1 - \frac{2}{3}k_e + \frac{1}{9}k_e^2$$

Cuando:

$$k_e = \frac{h_t}{y_e}$$

Dónde:

$h_t$ : Pérdidas de carga total en la conducción.

$$h_t = 4.098 * 10^{-3} * K * \frac{Q^{1.9}}{D^{4.9}} * l$$

Dónde:

D: Diámetro de la tubería.

l: Longitud de la tubería.

K: Depende del material de la tubería.

- **ALTURA MÍNIMA REAL ( $Y_D$ ):**

$$Y_D = z_d * y_d$$

Dónde:

$y_d$ : Y máx.

$z_d$ : Factor de pérdida de carga por efecto del golpe de ariete.

$$z_d = 1 - 0.593 * k_e^3 + 1.556 * k_e^2 - 1.683 * k_e$$

- **PERÍODO DE OSCILACIONES (T).** El período de oscilaciones se calcula según:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L \cdot S_{CH}}{g \cdot S_T}}$$

- **PROPAGACIÓN DE LA ONDA (c).** La Propagación de ondas c es:

$$c = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{KD}{E\delta}}}$$

Dónde:

c: es la celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería, [m/s] – SI.

K: es el módulo de elasticidad del fluido (módulo de Bulk), [N/m<sup>2</sup>] – SI.

ρ: es la densidad del líquido, [kg/m<sup>3</sup>] – SI.

D: es el diámetro de la tubería, [m] – SI.

E: es el módulo de elasticidad de la tubería, [N/m<sup>2</sup>] – SI.

δ: es el espesor de la tubería, [m] – SI.

- **PRESIÓN HIDROSTÁTICA (P):**

$$P = \rho * g * h$$

Dónde:

g: gravedad.

h: altura de la columna de agua.

## 5) PROCEDIMIENTO:

- Verificar el nivel de agua en el reservorio.
- Conectar la fuente de energía eléctrica de la bomba, módulo de adquisición de datos y el computador.
- Encender el computador e ingresar al programa de adquisición de datos de la Chimenea de Equilibrio.
- Cerrar la válvula de accionamiento rápido y la válvula de apertura rápida.
- Encender la bomba centrífuga.
- Esperar hasta alcanzar el nivel de agua en el depósito (690mm en CH).

- Ejecutar el programa.
- Abrir la válvula de apertura rápida y esperar un tiempo considerable de 10 seg. como mínimo, para luego cerrar la misma y así producir el golpe de ariete.
- Obtener las lecturas máximas y mínimas producidas en la chimenea de equilibrio, hasta que la oscilación permanezca aproximadamente constante.
- Analizar la curva obtenida en la base de la chimenea de equilibrio por medio del transductor de presión.
- Detener el programa con el botón *parar*.
- Generar el reporte de datos en la hoja de cálculos Excel, pulsando el botón *generar reportes*.
- Apagar la bomba.
- Desconectar el banco de pruebas.

#### **6) CÁLCULO TIPO**

#### **7) TABLA DE RESULTADOS: ver anexo E**

#### **8) CUESTIONARIO**

- Graficar  $\Delta p$  vs  $t$
- Graficar  $\Delta h$  vs  $t$

#### **9) CONCLUSIONES**

#### **10) RECOMENDACIONES**

#### **11) BIBLIOGRAFÍA**



## CAPÍTULO VII

### 7. ANÁLISIS DE COSTOS

#### 7.1 Descripción del análisis de costos

En este capítulo se detallan los gastos realizados durante todo el proyecto de tesis denominado automatización de la adquisición de datos para el banco de pruebas de la chimenea de equilibrio.

#### 7.2 Costos directos

En los costos directos consideramos todos los gastos por materiales, mano de obra, equipos y maquinaria utilizada.

##### 7.2.1 Costos de accesorios y materiales.

Tabla 17. Costos de accesorios y materiales.

| Costos de accesorios y materiales hidráulicos  |                         |        |          |             |        |
|--|-------------------------|--------|----------|-------------|--------|
| Elemento                                       | Descripción             | Unidad | Cantidad | P. Unitario | Costo  |
| Bushin   | Bronce 3/4" a 1/2"      | Unidad | 2        | 2,50        | 5,00   |
| Codo cachimbo                                  | RR PP 3/4"              | Unidad | 2        | 1,25        | 2,50   |
| Bushin   | RR PP 3/4" a 1/2"       | Unidad | 1        | 1,25        | 1,25   |
| Codo 45°                                       | RR H PP 1/2"            | Unidad | 1        | 1,00        | 1,00   |
| Cruz   | Fundición 3/4"          | Unidad | 1        | 1,25        | 1,25   |
| Cruz   | Fundición 1/2"          | Unidad | 1        | 1,00        | 1,00   |
| Niples   | Fundición 3/4"x3cm      | Unidad | 1        | 0,60        | 0,60   |
| Niples   | Fundición 3/4"x5cm      | Unidad | 1        | 0,75        | 0,75   |
| Teflón   | Blanco                  | Unidad | 2        | 0,5         | 1,00   |
| Costos de accesorios y materiales electrónicos |                         |        |          |             |        |
| Tarjeta de adquisición de                      | NI USB-6009 Bus-Powered | Unidad | 1        | 461,67      | 461,67 |
| Transmisor de presión                          | SITRANS P220 0-30 Psi   | Unidad | 1        | 214,14      | 214,14 |
| Transmisor de presión                          | SITRANS P220 0-60 Psi   | Unidad | 2        | 200,99      | 401,98 |
| Transmisor de presión                          | SITRANS P220 0-100 Psi  | Unidad | 1        | 207,47      | 207,47 |
| Fuente de alimentación                         | KY-24W-12L              | Unidad | 1        | 25,00       | 25,00  |
| Cable flexible                                 | #2250 FT 24AWG 4C SHLD  | Metros | 20       | 2,00        | 40,00  |
| Resistencias                                   | 250 $\Omega$            | Unidad | 10       | 0,05        | 0,50   |
| Terminales                                     | 12 Input/Output         | Unidad | 1        | 1,50        | 1,50   |
| Costos de implementos                          |                         |        |          |             |        |
| Sellador                                       | IPS Plus                | Unidad | 1        | 5,50        | 5,50   |
| Perfil L                                       | Aluminio 1/2"x1/2"      | Metros | 3        | 1,00        | 3,00   |

|          |                        |        |    |              |                |
|----------|------------------------|--------|----|--------------|----------------|
| Acrílico | Transparente 60cmx60cm | Unidad | 1  | 5,00         | 5,00           |
| Pernos   | 1/8"x15mm              | Unidad | 18 | 0,10         | 1,80           |
| Pernos   | 1/8"x50mm              | Unidad | 2  | 0,50         | 1,00           |
| Taype    | Negro                  | Unidad | 1  | 1,00         | 1,00           |
|          |                        |        |    | <b>TOTAL</b> | <b>1383,91</b> |

Fuente: Autores.

### 7.2.2 Costos de maquinaria y equipos utilizados.

Tabla 18. Costo de maquinaria y equipos utilizados.

| Máquinas/Herramientas | Costo/Hora | Horas Equipo | Costo(USD)   |
|-----------------------|------------|--------------|--------------|
| Tarrajá mecánica      | \$1,00     | 1            | 1,00         |
| Entenalla             | \$1,00     | 3            | 3,00         |
| Taladro de mano       | \$2,00     | 1            | 2,00         |
| Otros equipos         | -          | -            | 25,00        |
| <b>TOTAL</b>          |            |              | <b>31,00</b> |

Fuente: Autores.

### 7.2.3 Costos de mano de obra.

Tabla 19. Costo de mano de obra.

| Trabajador         | Salario/Hora | Horas de trabajo | Costo (USD)   |
|--------------------|--------------|------------------|---------------|
| Plomero            | 2,82         | 7                | 19,74         |
| Tornero            | 2,82         | 2                | 5,64          |
| Ingeniero Mecánico | 2,82         | 100              | 282           |
| <b>TOTAL</b>       |              |                  | <b>307,38</b> |

Fuente: Autores.

### Tabla de costos directos:

Tabla 20. Costos directos.

| COSTO POR             | VALOR (USD)    |
|-----------------------|----------------|
| Material y accesorios | 1383,91        |
| Maquinaria y equipos  | 31,00          |
| Mano de obra          | 307,98         |
| <b>TOTAL</b>          | <b>1722,29</b> |

Fuente: Autores.

### 7.3 Costos indirectos

Tabla 21. Costos indirectos.

| Detalles                            | Cantidad (%CD) | Valor(USD)    |
|-------------------------------------|----------------|---------------|
| Ingenieriles (Diseño y supervisión) | 15%            | 258,34        |
| Imprevistos                         | 10%            | 172,23        |
| Utilidad                            | 0              | -             |
| <b>TOTAL</b>                        |                | <b>430,53</b> |

Fuente: Autores.

### 7.4 Costos totales

Los costos totales se obtienen al sumar los costos directos más los costos indirectos:

Tabla 22. Costos totales.

| Detalles              | Valor(USD)      |
|-----------------------|-----------------|
| Costos directos       | 1722.29         |
| Costos indirectos     | 430.53          |
| <b>Costos totales</b> | <b>2 152.86</b> |

Fuente: Autores.

## **CAPÍTULO VIII**

### **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **8.1 Conclusiones**

La automatización de la toma de datos de la chimenea de equilibrio del laboratorio de turbomaquinaria, permite obtener de manera rápida y confiable datos sobre las variables físicas, como es variaciones de presión y nivel, que posteriormente nos permite obtener las curvas características que indican las oscilaciones de presión.

La selección adecuada de los transmisores de presión SITRANS P220, tarjeta DAQ y el software LabVIEW, nos permitió la adquisición de datos en tiempo real, siendo de gran aplicación para el estudio del golpe de ariete.

Las gráficas representadas del primer ensayo nos indican que las presiones son elevadas y oscilatorias, mientras que en el segundo ensayo se obtuvo una presión mínima cuando se realiza el golpe de ariete, esto nos indica que la chimenea de equilibrio amortigua las sobrepresiones en las tuberías eficientemente, por tal razón este tipo de dispositivos son muy utilizadas en centrales hidroeléctricas.

Al término del trabajo de tesis se pudo comprobar el grave problema que significa el golpe de ariete en los sistemas hidráulicos, y la necesidad de instalar un dispositivo para la reducción del mismo.

#### **8.2 Recomendaciones**

Operar el banco de pruebas chimenea de equilibrio con la presencia del asistente de área o la persona autorizada quien proporcionará información para la ejecución de los ensayos.

Desarrollar los ensayos utilizando equipos de protección, como es mandil y auditivos.

Realizar como mínimo cada seis meses el funcionamiento del banco de pruebas chimenea de equilibrio, con el fin de evitar la acumulación de sedimentos en tuberías,

reservorio, depósito, accesorios y principalmente en las partes sensibles de los transmisores de presión.

Mantener el reservorio sin agua y desconectado como también la fuente de energía cuando no esté en uso.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**CALDERON, D & ENRÍQUEZ, D. 2011.** Diseño y Optimización de una hoja de cálculos para el Dimencionamiento de Chimeneas de Equilibrio. Quito-EPN : s.n., 2011.

**CEMBRANOS, N. J. 2002.** Automatismos Eléctricos, Neumáticos e Hidráulicos. Tercera. Madrid : s.n., 2002.

**CORPORATION, NATIONAL INSTRUMENTS. 2003.** LabVIEW. Manual del Usuario. National Instruments Corporation : s.n., 2003.

**CREUS, A. 2011.** Instrumenatación Industrial. Barcelona : s.n., 2011.

**FEATHERSTONE, R. E. & NALLURI, C. 1995.** Civil Engineering Hydraulics. Tercera. 1995.

**FRADEN, J. 2004.** Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs, and Applications. California : s.n., 2004, pág. 20.

**GARCÍA, M. E. 2001.** Automatización de Procesos Industriales. 2001.

**GUILLÉN, A. & MARCALLA, A. 2011.** Automatización de las Turbomáquinas del Laboratorio de Fluidos de la Facultad de Mecánica. Riobamba-ESPOCH : s.n., 2011.

**LAJARA, V. J. & PELEGRÍ, S. J. 2007.** LabVIEW. Entorno Gráfico de Programación. Primera. México : s.n., 2007.

**LINSLEY, R. & FRANZINI, J. 1972.** Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. Nueva York : s.n., 1972.

**MATAIX. 1986.** Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Madrid : s.n., 1986, pág. 312.

**ORTÍZ, F.R.& MACHADO, H.E. 2001.** Pequeñas Centrales Hidroelectricas. Bogotá : s.n., 2001, pág. 228.

**PALLÁS, A. R. 2003.** Sensor y Acondicionadores de Señal. Barcelona : s.n., 2003, pág. 32.

**SÁNCHEZ, D.U. 2012.** Máquinas Hidráulicas. San Vicente : s.n., 2012, pág. 291.

**SOLOMAN, S. 2010.** Sensor Handbook. 2010, pág. 180.

**URBACA. 2012.** Guía de Selección, Válvulas de Retención. Segunda. 2012.

**ZÁRUBA, J. 1993.** Water Hammer in Pipe - Line Systems. Czechoslovakia : s.n., 1993.